



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

Sistema de medición del patrón de radiación de antenas en el rango de 1 MHz a 4 GHz. Mejora de rango dinámico y mando remoto

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones.*

Autores :

Santiago Patricio Icaza Samaniego C.I. 0104701651

Juan Vicente Inga Ortega C.I. 0105953772

Director :

Ing. Alcides Fabián Araujo Pacheco M.Sc. C.I. 0102358504

Co-Director :

Ing. Luis Geovanny Lupercio Novillo M.Sc. C.I. 0102361003

Cuenca - Ecuador

25/04/2019



Resumen

En la Facultad de Ingeniería se diseñó un sistema didáctico para obtener patrones de radiación de antenas en un rango de frecuencias de 1 a 6 GHz, el cual utilizaba un detector RMS de potencia de señal radioeléctrica. En el presente trabajo, se presentan algunas mejoras al sistema. Se utilizaron un detector logarítmico y un detector RMS de potencia de señal radioeléctrica. Con el detector RMS se obtuvo un rango dinámico de 61 dB y con el detector logarítmico un rango dinámico de 78 dB. Para aumentar el rango dinámico se ha implementado un amplificador de bajo ruido (LNA) con una ganancia de +20 dB. Teniendo en cuenta las pérdidas de los elementos, se obtuvo una sensibilidad de -69 dBm, con la posibilidad de utilizar dos amplificadores de bajo ruido (LNA) para ampliar la sensibilidad a -85 dBm.

El sistema cuenta con un soporte para la antena transmisora y otro para la antena receptora. La antena receptora y su soporte giran en torno a un eje y cuentan con un sistema de control inalámbrico. La parte superior del soporte se comunica con la parte inferior mediante comunicación bluetooth para transferencia de datos, esto resuelve el problema y las dificultades con el cableado que tuvo el sistema inicial. Debido a que no se cuenta con una cámara anecoica se utilizaron filtros de RF en la frecuencia de prueba para mejorar la definición del patrón de radiación atenuando señales extrañas a las de prueba.

Para controlar y sincronizar el sistema, se diseñó un programa en el lenguaje Python. El programa implementa una interfaz gráfica que controla todo el proceso de medición. El programa se conecta con el sistema de recepción mediante comunicación serial y así se controla el giro del eje de la torre de recepción y la transferencia de datos.

Se realizaron mediciones en varias frecuencias de prueba y con distintos tipos de antenas con sus respectivos filtros de RF. Los resultados fueron contrastados con resultados teóricos. Las gráficas resultantes verifican una muy buena aproximación del sistema diseñado con las predicciones teóricas.

Palabras claves: Detector de potencia. Patrón de radiación. LNA. ADC. PAP. Antena.



Abstract

At the Faculty of Engineering, a didactic system was designed to obtain radiation patterns of antennas in a frequency range of 1 to 6 GHz, which uses a radio signal power RMS detector. In the present work, some improvements are presented in the system.

A logarithmic detector and a radio signal power RMS detector were used. With the RMS detector, a dynamic range of 61 dB was obtained and with the logarithmic detector a dynamic range of 78 dB. To increase the dynamic range, a low noise amplifier (LNA) with a gain of +20 dB has been implemented. Taking into account the losses of the elements, a sensitivity of -69 dBm was obtained, with the possibility of using two low noise amplifiers (LNA) to extend the sensitivity to -85 dBm.

The system has a support for the transmitting antenna and another for the receiving antenna. The receiving antenna and its support rotate around an axis and have a wireless control system. The upper part of the support communicates with the lower part by means of Bluetooth communication for the transfer of data, this solves the problem and the difficulties with the wiring that the initial system had. Due to the fact that an anechoic chamber is not available, RF filters were used in the test frequency to improve the definition of the radiation pattern by attenuating strange signals to the test ones.

To control and synchronize the system, a program was designed in the Python language. The program implements a graphical interface that controls the entire measurement process. The program is connected to the reception system by serial communication and thus controls the rotation of the axis of the reception tower and the data transfer.

Measurements are made at several test frequencies and different types of antennas with their corresponding RF filters. The results were contrasted with theoretical results. The resulting graphs verify a good approximation of the system designed with the theoretical predictions.

Keywords: Power detector. Radiation pattern. LNA. ADC. PAP. Antenna.



Índice general

Resumen	II
Abstract	III
Índice general	IV
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XV
Abreviaciones y acrónimos	XVI
Agradecimientos	XXI
Agradecimientos	XXII
Agradecimientos	XXIII
1. Introducción	1
1.1. Identificación del Problema	2
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación	2
1.4. Alcance	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo General	4
1.5.2. Objetivos Específicos	4
2. Parámetros Fundamentales de las Antenas	5
2.1. Introducción	6



2.2.	Radiación de una antena	6
2.3.	Parámetros de una Antena	7
2.3.1.	Patrón de Radiación	7
2.3.1.1.	Lóbulos del Patrón de Radiación	9
2.3.2.	Regiones de Campo	10
2.3.3.	Densidad de Potencia de Radiación e Intensidad de Radiación	12
2.3.4.	Ancho de Banda	13
2.3.5.	Directividad	13
2.3.6.	Eficiencia de una Antena	14
2.3.7.	Ganancia	16
2.3.8.	Polarización	17
2.3.9.	Reciprocidad de una Antena	17
2.3.10.	Tipos de Antenas	19
2.3.10.1.	Antenas de Hilo	20
2.3.10.2.	Antenas Yagi-Uda	21
2.3.10.3.	Antenas Microstrip	21
3.	Aspectos Teóricos Adicionales	23
3.1.	Introducción	24
3.2.	Medición de Potencia en Ondas de Radio Frecuencia	24
3.2.1.	Potencia Media	24
3.2.2.	Potencia de Pulso	25
3.2.3.	Potencia Pico de Envolvente	26
3.3.	Detectores de Potencia de RF	27
3.3.1.	Método de detección por Termistores	27
3.3.1.1.	Método Bolométrico	29
3.3.2.	Método de Detección por Termocupla	33
3.3.3.	Método de Detección por Diodo	34
3.3.4.	Detectores de Potencia en Circuitos Integrados	36
3.3.4.1.	Función de transferencia de un Detector RF	38
3.3.4.2.	Detectores RMS	39
3.3.4.3.	Detectores Logarítmicos	43
3.4.	Sistema de Calibración	45
3.5.	Filtro de Radiofrecuencia	47



3.6. Amplificadores de bajo ruido LNA	48
4. Diseño y construcción de la Maqueta	50
4.1. Componentes Principales para medir el Patrón de Radiación de una Antena en modo Recepción	51
4.2. Solución Propuesta para el Sistema	53
4.3. Etapas Principales del Sistema Final	53
4.4. Componentes del Sistema Final	54
4.4.1. Generador de Señales	55
4.4.2. Placas Electrónicas	55
4.4.3. Baterías	58
4.4.4. Soportes	58
4.4.4.1. Sistema de posicionamiento de la antena receptora	59
4.5. Prototipo Final del Sistema	60
4.5.1. Torre de Soporte de Antena Transmisora	60
4.5.2. Torre de Soporte de Antena de Prueba Receptora	60
4.5.3. Cubierta Protectora, Fuente de 12V y Cable USB	67
4.6. Control y Procesamiento de señales	67
4.6.1. Interfaz gráfica de Usuario	67
4.6.2. Procesamiento de Datos	67
5. Metodología de Medición	69
5.1. Determinación de la Región de Fraunhofer	70
5.2. Puesta en Marcha del Equipo	71
5.2.1. Configuración del Generador de señales RF	71
5.2.2. Configuración de la Torre de Recepción	71
5.3. Consumo de Corriente	75
6. Resultados	76
6.1. Resultados Preliminares	77
6.1.1. Prueba de la Antena Microstrip a una frecuencia de 2.4 GHz	77
6.1.2. Prueba de un Arreglo de Antenas	77
6.1.3. Pruebas con la Antena Trébol	80
7. Conclusiones y Recomendaciones	83



7.1. Conclusiones	84
7.2. Recomendaciones	85
7.3. Trabajos Futuros	86
A. Diseño de Filtros RF	89
A.1. Proceso de diseño de Filtros RF	90
B. Resultados Adicionales	100
B.1. Frecuencia de operación de distintas antenas	101
B.2. Resultados Adicionales	101
B.2.1. Pruebas en la Antena Vivaldi	102
B.2.2. Pruebas en la Antena Logarítmica	106
B.2.3. Pruebas en la Antena Dipolo	109
B.2.4. Pruebas en la Antena Girasol	111
B.2.5. Resultados y mediciones erróneas	112
C. Guía del usuario del Detector	115
D. Manual del Usuario	117
D.1. Componentes del Sistema	118
D.1.1. Componentes Físicos	118
D.1.1.1. Torre de Soporte de Antena Transmisora	118
D.1.1.2. Torre de Soporte de Antena de Prueba (Receptora)	118
D.1.1.3. Cubierta Protectora	125
D.1.1.4. Fuente de 9v y conector USB	125
D.1.2. Puesta en Marcha del Equipo	125
D.1.2.1. Configuración del Generador de señales RF	125
D.1.2.2. Configuración de la Transmisión	126
D.1.2.3. Configuración de la Torre de Recepción	126
D.1.2.4. Encendido de la Torre de Recepción	132
D.1.2.5. Resultado Final de la puesta en marcha del Equipo	132
D.2. Uso de la Interfaz Gráfica de Usuario	135
D.2.1. Conexión	135
D.2.2. Motor	136
D.2.3. Captura de Datos	137



D.2.4. Procesos	139
D.2.5. Funcionalidades Extra	139
D.2.6. Salir	141
E. Código implementado en Python y en los Arduino Nano	142
F. Modelo de Práctica para el Laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca	156
Bibliografía	161





Índice de figuras

2.1. Operación Básica de Transmisión y Recepción de Antenas [1]	6
2.2. Diferentes representaciones de patrón de radiación: (a) rectangular; (b) polar; (c) tri-dimensional; y (d) contorno de valor constante [2]	8
2.3. Patrón de radiación: (a) Omnidireccional; (b) Direccional; [3]	8
2.4. Ancho de Haz a -3 dB [4]	9
2.5. Lóbulos de radiación y ancho de haz de un patrón de una antena. [5]	10
2.6. Regiones de Campo [6]	12
2.7. Ancho de Banda (HPBW y FNBW) [7]	14
2.8. VSWR para una antena comercial omnidireccional para GSM (890-960 MHz) [8]	16
2.9. Disposición de antenas para mediciones de patrones y teorema de reciprocidad. [5]	18
2.10. Diversas antenas comerciales [9]	19
2.11. Distintos tipos de antena hilo. [10]	20
2.12. Diagrama de radiación de un dipolo en el plano horizontal y vertical. [10]	20
2.13. Antena Yagi-Uda. [10]	21
2.14. Patrón de Radiación 3D polar de una antena Yagi-Uda. [11]	22
2.15. Patrón de radiación horizontal y vertical. [12]	22
3.1. Tipos de medición de potencia [13]	25
3.2. Onda tipo pulsada y parámetros de potencia medidos [13]	26
3.3. Señal Modulada de alta frecuencia [14]	26
3.4. Potencia de señal modula en alta frecuencia [14]	27
3.5. Diagrama de bloques para medición de potencia de una señal RF [15]	28
3.6. Comportamiento de la resistencia ante cambio de temperatura en termistores NTC y PTC [16]	28
3.7. Gráfica Potencia-Resistencia de un termistor [16]	29



3.8. a) Elemento bolométrico coaxial formado por un sustrato de mica y dos alambres de Wollaston. b) Ampliación de elemento barretter [17]	30
3.9. Curva de un barretter para $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [17]	31
3.10. Termistor NTC [17]	31
3.11. Método de medición de potencia con bolómetro y puente de Wheatstone [15] . .	32
3.12. Medición de potencia RF con Termocupla [18]	33
3.13. Composición de sensor HP8481A [15]	34
3.14. Circuito para medición de potencia por detector de diodo [13]	35
3.15. Curva de operación del diodo [13]	35
3.16. Tarjeta de evaluación para detección de radiofrecuencia	37
3.17. Función de transferencia General [19]	38
3.18. Función de transferencia de un Diodo [19]	38
3.19. Ejemplo de señales CDMA e IS-95 [20]	39
3.20. Parámetros de voltaje RMS, promedio y pico de una onda sinusoidal [21]	40
3.21. Diagrama funcional del detector ADL5902 [22]	40
3.22. Diagrama de bloques de un detector RMS [23]	41
3.23. Función de transferencia del detector RMS ADL5902 [23]	41
3.24. Características del chip ADL5902, 50 MHz - 9 GHz, 65 dB TruPwr RMS Detector	42
3.25. El detector LOG utiliza la función inherente de transferencia de corriente/tensión de un diodo, donde I_S y V_T son la corriente de saturación y la tensión térmica, respectivamente, del diodo [22]	43
3.26. Diagrama de bloques de un detector LOG [23]	43
3.27. Función de transferencia del detector LOG ADL5513 [24]	44
3.28. Características del chip ADL5513, 1 MHz - 4 GHz, 80 dB Logarithmic Detector .	44
3.29. Comportamiento del detector RMS	46
3.30. Comportamiento del detector LOG	47
3.31. Filtro pasa banda ideal [25]	47
3.32. Banda de Transición del filtro pasa banda [25]	48
3.33. Ganancia en todo el ancho de banda del LNA a diferentes temperaturas [26] . . .	49
4.1. Sistema mínimo para obtener patrones de radiación [5]	51
4.2. Solución Propuesta para obtener el patrón de Radiación de una Antena	53
4.3. Diagrama de bloques del sistema didáctico para obtención de patrones de radiación	53
4.4. Componentes del Sistema	55



4.5. Componentes a) Parte Superior b) Parte Inferior	56
4.6. Principales placas para control y transmisión de datos	57
4.7. Baterías de alimentación	58
4.8. Soportes para las antenas	58
4.9. Motor de pasos bipolar EM-402	59
4.10. Sensor infrarrojo TCRT5000	59
4.11. A4988 Stepper Motors Driver Module [27]	60
4.12. Prototipo Final del Sistema	61
4.13. Torre de soporte para la antena transmisora	62
4.14. Torre de Soporte de Antena Receptora	63
4.15. Parte A de la torre	64
4.16. Componentes de la parte Superior	64
4.17. Componentes de la parte Inferior	65
4.18. Parte C (Externa)	66
4.19. Parte C (Interna)	66
4.20. Interfaz completa desarrollada en Python	68
5.1. Conexión de (a) Generador de Señales (b)Entrada del conector de la torre TX . .	72
5.2. Conexión Final de la Transmisión	73
5.3. Parte Superior de la Torre de Recepción	74
6.1. Patrón de Radiación Obtenido utilizando el Detector: (a) RMS; (b) Logarítmico	78
6.2. Comparación de los Patrones de Radiación en Coordenadas: (Izquierda) Polares; (Derecha) Rectangulares	79
6.3. Arreglo binomial de antenas omnidireccionales	79
6.4. Patrón de Radiación Obtenido utilizando el Detector Logarítmico	80
6.5. Comparación de los Patrones de Radiación en Coordenadas: (Izquierda) Polares; (Derecha) Rectangulares	80
6.6. Patrón de Radiación Obtenido utilizando el Detector: (a) RMS; (b) Logarítmico	81
6.7. Comparación de los Patrones de Radiación en Coordenadas: (Izquierda) Polares; (Derecha) Rectangulares	82
A.1. Comparación entre filtro Butterworth y Chebyshev [25]	90
A.2. Terminales Term de 50 Ω	92



A.3. Msub define las características el sustrato FR4 y S_Param define las frecuencias de simulación	92
A.4. Calculo de lineas MLIN	93
A.5. Filtro de tercer orden con 0.5 dB de rizado	94
A.6. Estructura generalizada para filtro de línea acoplada de microstrip. A partir de las ecuaciones anteriores podemos obtener impedancias características de modo par y impar	95
A.7. Parametros para encontrar MCLIN	97
A.8. Resultado final en el esquemático de ADS	98
A.9. Layout del filtro a 1.77 Ghz	98
A.10.Simulación del comportamiento del filtro de 1.77 GHz en ADS	98
A.11.Simulación del comportamiento del filtro de 1.77 GHz en la práctica	99
A.12.Distintos tipos de filtros construidos	99
B.1. Uso del PXI para transmitir y recibir a 1090 Mhz con potencia de +5dBm . . .	101
B.2. Uso del PXI para verificar espectros aledaños a la frecuencia de prueba de 1850 Mhz	102
B.3. Patrón de radiación de una Vivaldi a 1090 MHz uso del RMS y con etapa de filtrado digital	102
B.4. Patrón de radiación de una Vivaldi a 1770 MHz uso del RMS y sin etapa de filtrado digital	103
B.5. Patrón de radiación de una Vivaldi a 1770 MHz uso del LOG y sin etapa de filtrado digital	103
B.6. Patrón de radiación de una Vivaldi a 1850 MHz uso del LOG y con etapa de filtrado digital	104
B.7. Patrón de radiación de una Vivaldi a 2270 MHz uso del LOG y sin etapa de filtrado digital	104
B.8. Patrón de radiación de una Vivaldi a 2800 MHz uso del LOG y sin etapa de filtrado digital	105
B.9. Patrón de radiación de una Vivaldi a 2800 MHz uso del LOG y con etapa de filtrado digital	105
B.10.Patrón de radiación de una Logarítmica a 2270 MHz uso del RMS y sin etapa de filtrado digital	106
B.11.Patrón de radiación de una Logarítmica a 2400 MHz uso del LOG y sin etapa de filtrado digital	106



B.12. Patrón de radiación de una Logarítmica a 2400 MHz uso del LOG y con etapa de filtrado digital	107
B.13. Patrón de radiación de una Logarítmica a 2800 MHz uso del RMS y sin etapa de filtrado digital	107
B.14. Patrón de radiación de una Logarítmica a 2800 MHz uso del LOG y con etapa de filtrado digital	108
B.15. Patrón de radiación de un Dipolo a 1090 MHz, uso del RMS y sin etapa de filtrado digital	109
B.16. Patrón de radiación de un Dipolo a 1090 MHz, uso del RMS y con etapa de filtrado digital	109
B.17. Patrón de radiación de un Dipolo a 1090 MHz, uso del LOG y con etapa de filtrado digital	110
B.18. Patrón de radiación de una Girasol a 2800 MHz Horizontal, uso del LOG y sin etapa de filtrado digital	111
B.19. Patrón de radiación de una Girasol a 2800 MHz Horizontal, uso del LOG y con etapa de filtrado digital	111
B.20. Patrón de radiación defectuoso	112
B.21. Diagramas de directividad [28]	113
C.1. Guía del usuario del detector RF	116
D.1. Componentes Físicos del Sistema	119
D.2. Torre de Soporte para la antena transmisora	120
D.3. Conectores de la Torre Transmisora	120
D.4. Torre de Soporte de Antena Receptora	121
D.5. Parte A de la torre	121
D.6. Componentes de la parte Superior	122
D.7. Componentes de la parte Inferior	123
D.8. Parte C (Externa)	124
D.9. Parte C (Interna)	125
D.10. Conexión de (a) Generador de Señales (b) Entrada del conector de la torre transmisora	126
D.11. Conexión Final de la Transmisión	127
D.12. Parte Superior de la Torre de Recepción	129
D.13. Colocación del Filtro	130



D.14.Colocación de Baterías	131
D.15.Encendido de la Torre de Recepción	133
D.16.Conexión con la PC y alimentación de la parte inferior	133
D.17.Resultado Final	134
D.18.Interfaz gráfica de Usuario	136
D.19.Conexión de la PC con el Equipo. (a) No conectado (b) Conectado	136
D.20.Función <i>Motor</i>	137
D.21.Función <i>Captura de Datos</i>	137
D.22.Patrón de Radiación obtenido para una Antena Microstrip de 2.4 GHz (Detector RMS)	138
D.23.Patrón de Radiación obtenido para una Antena Microstrip de 2.4 GHz (Detector LOG)	138
D.24.Funciones de <i>Procesos</i>	139
D.25.Patrón de Radiación filtrado. a)Patrón filtrado del detector RMS b)Patrón filtrado del detector LOG	140
D.26.Funcionalidades Extra	141



Índice de tablas

5.1. Cálculo del límite de campo lejano para las antenas probadas	70
A.1. Primer Acoplamiento del Filtro	94
A.2. Acoplamiento Intermedio del Filtro	95
A.3. Acoplamiento Final del Filtro	95
A.4. Impedancias de Linea modo PAR e IMPAR	96
A.5. Distintos filtros utilizados en la maqueta	97
B.1. Resultados de tipos de directividad en las antenas de estudio	114



Abreviaciones y Acrónimos

ADS Advanced Design System. [90](#)

AM Amplitud Modulada. [24](#)

Bluetooth Es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN).
[54](#), [55](#), [66](#)

f Factor de Ruido. [48](#)

HMI Human-Machine Interface. [3](#), [67](#)

LNA Low-Noise Amplifier. [2-4](#), [23](#), [37](#), [49](#)

LOG Logarítmico. [2](#), [23](#), [36](#), [43](#), [45-47](#), [54](#), [55](#)

NF Figura de Ruido. [48](#), [49](#)

NI-PXI Es un bus industrial de comunicaciones estándar para instrumentación y control. [112](#)

NTC Negative Temperature Coefficient. [28](#), [30](#)

PAP Paso a Paso. [54](#), [55](#), [67](#)

PTC Positive Temperature Coefficient. [28](#)

RF Radio Frequency. [3](#), [24](#), [27](#), [37](#)

RMS Root Mean Square. [2-4](#), [23](#), [36](#), [39](#), [40](#), [45](#), [46](#), [54](#), [55](#)

ROE Razón de onda estacionaria. [15](#)

RSSI Received Signal Strength Indicator. [42](#), [44](#)

VNA Vector Network Analyzer. [101](#)

VSWR Voltaje Standing Wave Ratio. [15](#)

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Santiago Patricio Icaza Samaniego, autor del trabajo de titulación "Sistema de medición del patrón de radiación de antenas en el rango de 1 MHz a 4 GHz. Mejora de rango dinámico y mando remoto", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 18 de abril de 2019



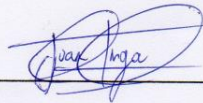
Santiago Patricio Icaza Samaniego

C.I: 0104701651

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Juan Vicente Inga Ortega, autor del trabajo de titulación "Sistema de medición del patrón de radiación de antenas en el rango de 1 MHz a 4 GHz. Mejora de rango dinámico y mando remoto", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 18 de abril de 2019



Juan Vicente Inga Ortega

C.I: 0105953772

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Santiago Patricio Icaza Samaniego, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Sistema de medición del patrón de radiación de antenas en el rango de 1 MHz a 4 GHz. Mejora de rango dinámico y mando remoto", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 18 de abril de 2019



Santiago Patricio Icaza Samaniego

C.I: 0104701651

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Juan Vicente Inga Ortega, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Sistema de medición del patrón de radiación de antenas en el rango de 1 MHz a 4 GHz. Mejora de rango dinámico y mando remoto", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 18 de abril de 2019



Juan Vicente Inga Ortega

C.I: 0105953772



Agradecimientos

A mis familiares y amigos

Gracias a Dios por darme sabiduría y capacidad para comprender de los conocimientos, la oportunidad de despertar cada día.

A mis Padres Lorgio y Leonor, quienes siempre me han apoyado de forma incondicional durante mi formación académica-personal que han sabido darme su ejemplo de trabajo y honradez, también a mis hermanos Mauricio, Christian, Ximena y Valeria, que con sus palabras de aliento, sus consejos, ánimos y confianza me supieron dar ánimos en todo momento.

Muchas gracias Alexandra, por ser una de las personas que estuvo conmigo en las buenas y en las malas durante todo este proceso, dándome su apoyo incondicional en todo momento.

A mi gran amigo y compañero de tesis Juan, gracias por compartir esos momentos frustrantes, desagradable y terribles en cada ciclo, pero aun así sobresalimos juntos como un equipo en las buenas y malas, logramos superarlos y apoyarnos mutuamente, SALUD amigo.

A todos mis compañeros y compañeras de clases quisiera darles las gracias por los buenos momentos que hemos compartido. Creo que todos hemos aprendido y aprendemos continuamente de todos y de nosotros mismos, tanto profesional como personalmente. Éxitos amigos: Christian M., Miguel Ángel M., Christina L., Anthony V., Mauricio B., José C., Darwin Z., José Luis M., Xavier G., Felipe A., Christian Z., Braulio A.

¡Gracias a ustedes!

Santiago Icaza S.
Cuenca, abril de 2019



Agradecimientos

A mis maestros

En especial, quiero agradecer a mi Director de Tesis Ing Alcides Araujo por la confianza que depositó en mí, su constante apoyo, sus indicaciones y orientaciones indispensables en el desarrollo de este trabajo. Gracias por todo el tiempo y dedicación prestada. Quisiera destacar la seriedad profesional y alegría que le caracteriza.

Gracias al Ing. Mauricio Espinoza por todas las enseñanzas otorgadas, por cada una de las agradables clases. Gracias al Ing. Miguel Corral por las enseñanzas brindadas, por ser una persona tan comprensible y agradable. Gracias al Ing. Lizandro Solano, por los momentos de diversión y preocupación, por toda la ayuda que me otorgaron de sus clases, les estaré eternamente agradecido por compartir sus conocimientos conmigo, por tener el don de gente, saber guiarnos e instruir para ser profesionales de bien.

A todos quienes marcaron cada etapa de mi vida universitaria pero especialmente a los Ingenieros Geovanny Lupercio, Fabián Astudillo y Andrés Vázquez, porque cada uno contribuyo de manera importante para poder alcanzar este logro y por su gran apoyo y motivación para la elaboración de esta tesis.

¡Gracias a ustedes!

Santiago Icaza S.
Cuenca, abril de 2019



Agradecimientos

A Dios por ser en realidad el camino, la verdad y la vida. A la virgen María por acompañarme y cuidarme en los mejores y peores momentos de mi vida.

A mis padres Vicente y Celia porque ellos se esforzaron, madrugaron, se desvelaron, sudaron y trabajaron más que yo en todo este trayecto. Esta meta es suya, muchísimas Gracias.

A mi hermana Adriana por darme sabios consejos, por su apoyo incondicional, por su paciencia y por molestarme cada día de mi vida desde que nací. Gracias hermana.

A mis maestros, especialmente al Ing. Alcides Araujo, Ing. Geovanny Lupercio e Ing. Fabián Astudillo por guiarnos, darnos consejos, solventarnos dudas, sugerirnos soluciones y apoyarnos en la realización de este trabajo.

A mi compañero Santiago por su dedicación, esfuerzo y paciencia en la elaboración de este proyecto.

A todas las personas que apoyaron de una u otra forma en la elaboración de este proyecto.

Juan Inga O.
Cuenca, abril de 2019



Capítulo 1

Introducción

Se presenta el problema a tratar, se justifica la realización del trabajo, así como se establece el alcance y objetivos a cumplir en el desarrollo del presente trabajo de titulación.



1.1. Identificación del Problema

Actualmente la facultad de ingeniería se encuentra interesada en complementar y reforzar el laboratorio de telecomunicaciones. Una de las necesidades del laboratorio es la medición del patrón de radiación de una antena. Esto ofrece muchas ventajas como por ejemplo: capturar la dirección de radiación de las antenas fabricadas o adquiridas, comprobar el funcionamiento de las mismas, obtener propiedades fundamentales, entre otras.

Se ha propuesto implementar un sistema didáctico automatizado para la obtención de patrones de radiación en un rango de frecuencias de 1 MHz a 4 GHz con la utilización de detectores **RMS** (Root Mean Square) y **LOG** (logarítmico) de potencia de señal radioeléctrica, los cuales brindan como salida un valor DC equivalente al valor en dBm de la potencia detectada en un punto de prueba. La utilización de este tipo de detectores permite manejar amplios rangos de frecuencia.

1.2. Antecedentes

El objetivo de este proyecto es diseñar una solución de bajo costo en comparación con los equipos que se encuentran en el mercado. Se utiliza un detector de potencia radioeléctrica que brinda resultados válidos en estudios de antenas, equipos transmisores y estudios de campo de radiofrecuencia.

1.3. Justificación

En un trabajo de titulación previo [17] se construyó un sistema didáctico para la obtención del patrón de radiación de antenas básicas de pequeñas dimensiones. Si bien el objetivo fue cumplido, durante la ejecución de aquel trabajo, quedó claro que algunas mejoras podían ser realizadas en el mismo, consideradas al definir el alcance del primer trabajo.

Las siguientes son las mejoras planteadas:

1. El rango dinámico conseguido en el primer trabajo fue de 65 dB; mediante la utilización de detectores logarítmicos el rango dinámico se ampliaría a 80 dB [29],[23], [24] con el desarrollo del presente trabajo.
2. Con la utilización de amplificadores de bajo ruido **LNA** (Low-Noise Amplifier) [30], se buscaba incrementar este rango dinámico propuesto (posiblemente 15 dB adicionales). Uno de los principales inconvenientes en la primera maqueta construida era la dificultad de detectar lóbulos secundarios menores. Por lo que el objetivo propuesto fue mejorar el rango dinámico en la detección, para lograr una mejora de la definición de los patrones de radiación de las antenas en azimuths donde los niveles son muy pequeños.

3. Otro problema constructivo de la maqueta original fue que el sistema de control utilizaba cableado físico; no fue factible implementar un control inalámbrico debido a que el detector [RMS](#) utilizado [24] tiene un ancho de banda amplio, por lo que el sistema inalámbrico interfería en la eficiencia del sistema. En la propuesta actual se plantea la utilización de un control inalámbrico, incorporando filtros de alta frecuencia [31], [32], para minimizar la incidencia del sistema de control.
4. Mejorar la automatización para la obtención del patrón de radiación, ya que el trabajo original utilizaba un procedimiento básicamente manual.
5. La necesidad de implementar una [HMI](#) (Human-Machine Interface) en una plataforma de software libre [33] [34] debido a la ventaja de no requerir licencias costosas, además son de libre distribución.

1.4. Alcance

La experiencia previa en el trabajo mostró que para realizar mediciones confiables se requería de una cámara anecoica, debido a que se utilizan detectores de banda ancha, estos son susceptibles de captar cualquier señal incidente (de hecho, demostraron ser elementos ideales para la medición de radiación no ionizante, trabajo que también debería ser impulsado en otro trabajo de titulación). No siendo posible disponer de una cámara anecoica, en la presente propuesta se utilizarán frecuencias de prueba para las cuales se diseñarán filtros de radiofrecuencia ([RF](#)) y microondas [32].

El proyecto planteado consiste en la mejora del sistema didáctico para la obtención automática de patrones de radiación de antenas en las bandas de 1 MHz a 4 GHz basado en detectores logarítmicos y detectores [RMS](#) de campo eléctrico. El proyecto plantea las siguientes actividades:

- Mejora del rango dinámico del prototipo existente.
- Automatización para el sistema de medición incluyendo control inalámbrico.
- Utilización del detector logarítmico.
- Diseño de filtros pasa banda en las frecuencias de prueba.
- Inclusión de un amplificador de bajo ruido [LNA](#).
- Implementación de una [HMI](#) usando software libre.
- Manual de usuario.
- Pruebas de validación.

Los entregables de este proyecto son:

- Informe final del proyecto.
- Maqueta funcional para obtención de un patrón de radiación de una antena en el plano azimutal.
- Código implementado en Software Libre.



- Manual y Guía de Usuario.
- Filtros de Alta Frecuencia.
- Amplificador de Bajo Ruido [LNA](#).
- Cables y conectores SMA.
- Baterías Recargables.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Mejorar el sistema didáctico para la obtención automática de patrones de radiación de antenas en las bandas de 1 MHz a 4 GHz basado en detectores logarítmicos y detectores RMS de campo eléctrico.

1.5.2. Objetivos Específicos

1. Aumentar del rango dinámico; el rango a alcanzar será mayor a 80 dB.
2. Utilizar detectores [RMS](#) y logarítmicos para mejorar el rango dinámico, además de incorporar un amplificador de bajo ruido.
3. Introducir un control inalámbrico al sistema de medición.
4. Implementar un proceso de medición completamente automático para la medición del patrón de radiación.
5. Implementar una interfaz hombre-máquina usando software libre.
6. Inclusión filtros de alta frecuencia sintonizados a frecuencias de prueba para mejorar la definición del patrón de radiación medido.



Capítulo 2

Parámetros Fundamentales de las Antenas

Se revisan aspectos teóricos sobre la antena. Se define el patrón de radiación de una antena y otros parámetros fundamentales. También se demuestra las relaciones que existen entre estos parámetros y como afectan al patrón de radiación. Se demuestra la propiedad de reciprocidad de la antena y porque se puede medir su patrón de radiación en modo recepción. Finalmente se describen los tipos más comunes de antenas.

2.1. Introducción

Una antena es un dispositivo conductor metálico usado para las transmisiones en frecuencias, diseñado con el objetivo de emitir y/o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio libre. Una antena transmisora transforma energía eléctrica en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa[35].

El rendimiento de una antena depende de varios factores y principalmente de las características de construcción de la misma. El tipo de antena, el material utilizado, las condiciones de construcción definirán los parámetros y el rendimiento de una antena. Algunos de los parámetros están interrelacionados y no es necesario especificarlos todos para obtener una descripción completa del rendimiento de la antena. [1]. Los parámetros pueden ser medidos y así se puede caracterizar una antena.

2.2. Radiación de una antena

Una antena puede definirse como un conductor eléctrico o un sistema de conductores que se usa para irradiar energía electromagnética o para recolectar energía electromagnética [3]. Para irradiar una señal, la antena convierte la energía eléctrica de radiofrecuencia en energía electromagnética y se irradia al ambiente [3]. En el caso de recepción, la antena receptora recibe la señal en forma de energía electromagnética y la transforma en energía eléctrica que la envía a la línea de transmisión a la que está conectada. Eso significa que las propiedades de una antena son similares tanto en el modo de transmisión como en el modo de recepción [36]. Por lo tanto, una antena es un dispositivo recíproco a diferencia de los amplificadores de RF. La figura 2.1 muestra la operación de transmisión y recepción de una antena.

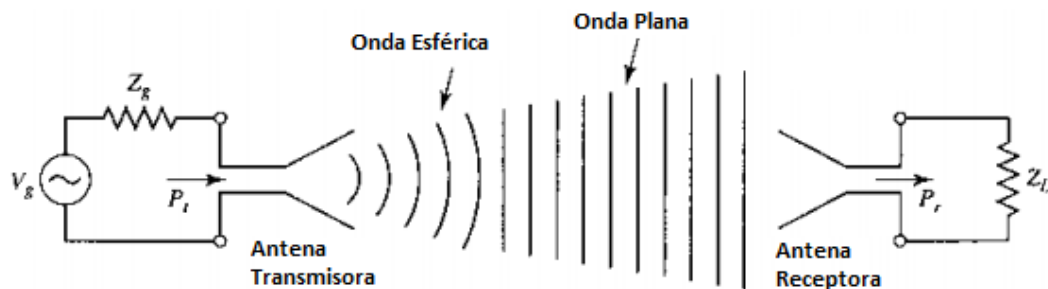


Figura 2.1: Operación Básica de Transmisión y Recepción de Antenas [1]

Una antena tiene un patrón de radiación que la caracteriza[2]. Una antena omnidireccional irradia o recibe señales electromagnéticas desde todas las direcciones. También hay antenas direccionales, las cuales dirigen el haz de radiación a una posición de dirección preferente. El

patrón de radiación de una antena queda definido según sus parámetros. Los parámetros de una antena se describen a continuación.

2.3. Parámetros de una Antena

El tipo de antena, ganancia, directividad, área efectiva de una antena, patrón de radiación, polarización, entre otros, son términos que están relacionados y las características de uno afecta a los otros. Todas estas características modifica el patrón de radiación de una antena, el cual depende de la aplicación.

2.3.1. Patrón de Radiación

Se puede caracterizar el rendimiento de una antena mediante el patrón de radiación, que es una representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de las coordenadas del espacio [3]. El patrón de radiación también se puede definir mediante una función matemática [5].

Una antena irradia energía en todas las direcciones del espacio. Una antena isotrópica (idealizada) irradiará la misma potencia en cualquier dirección. Sin embargo, en la práctica es muy difícil lograr construir una antena isotrópica perfecta por lo que una antena siempre irradiará mayor potencia en una dirección preferente, a lo que se conoce como lóbulo principal o haz principal. A menudo se presentan lóbulos secundarios en el patrón de radiación.

Hay varias formas de representación del patrón de radiación (Fig. 2.2), cada uno se utiliza para representar diferentes tipos de antenas. Por ejemplo, la representación rectangular se usa para antenas directivas que tienen un haz principal estrecho, la representación polar es natural para una antena que irradia en una amplia gama de ángulos [2]. Sin embargo, los patrones de radiación casi siempre se representan como una sección transversal bidimensional del patrón tridimensional [5] (representación rectangular y polar) que por lo general son cortes en θ o cortes en ϕ . Por lo general, los cortes se realizan de tal forma que deben intersectarse con el lóbulo principal.

La escala del patrón de radiación puede ser de potencia, expresada en una escala lineal en vatios por metro cuadrado, un campo lineal (intensidad de campo eléctrico) en voltios por metro o una escala logarítmica (decibelios). Esta escala viene normalizada, de modo que el valor de campo sea 1 (0 dB) y represente el valor máximo de potencia.

El patrón de radiación de una antena isotrópica es una buena referencia y se muestra en la figura 2.3 (a). El patrón de una antena direccional se muestra en la figura 2.3 (b).

El patrón de radiación proporciona un medio conveniente para determinar el ancho del haz de una antena o ancho de haz de potencia media, que es una medida común de la directividad de una antena [3]. El ancho de haz es el ángulo donde la captación de la señal es al menos la mitad

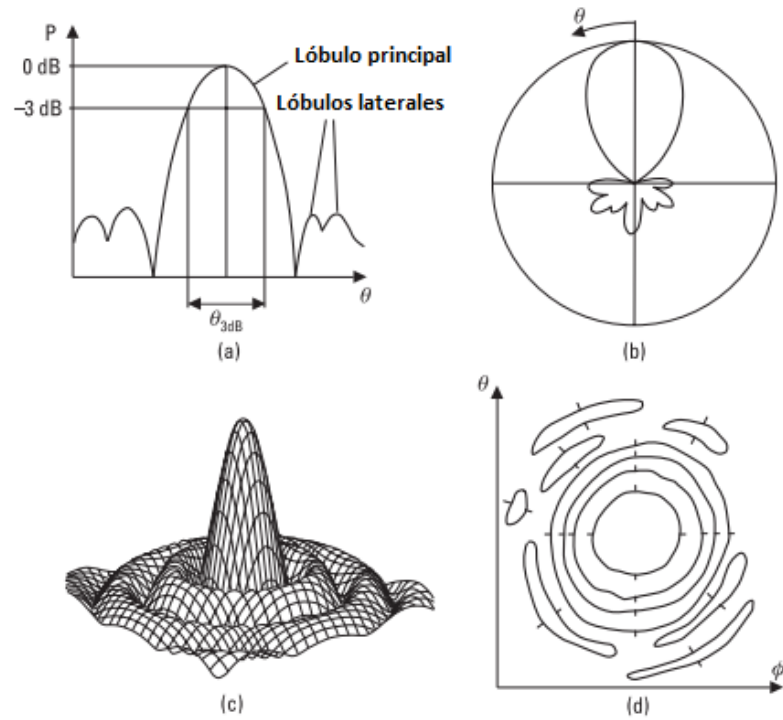


Figura 2.2: Diferentes representaciones de patrón de radiación: (a) rectangular; (b) polar; (c) tri-dimensional; y (d) contorno de valor constante [2]

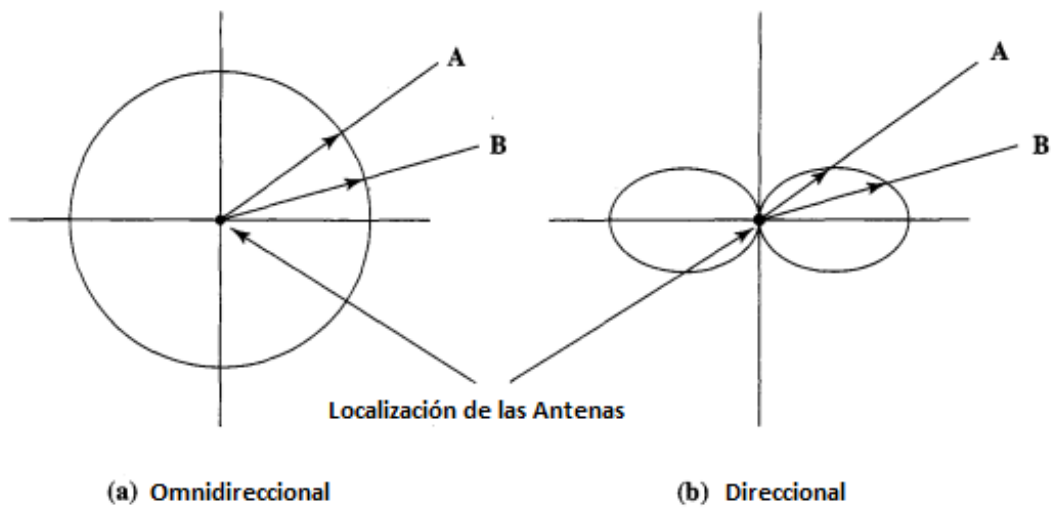


Figura 2.3: Patrón de radiación: (a) Omnidireccional; (b) Direccional; [3]

de la ganancia máxima (figura 2.4), por lo tanto, el ancho de haz indica el rango de ángulo donde la recepción es óptima.

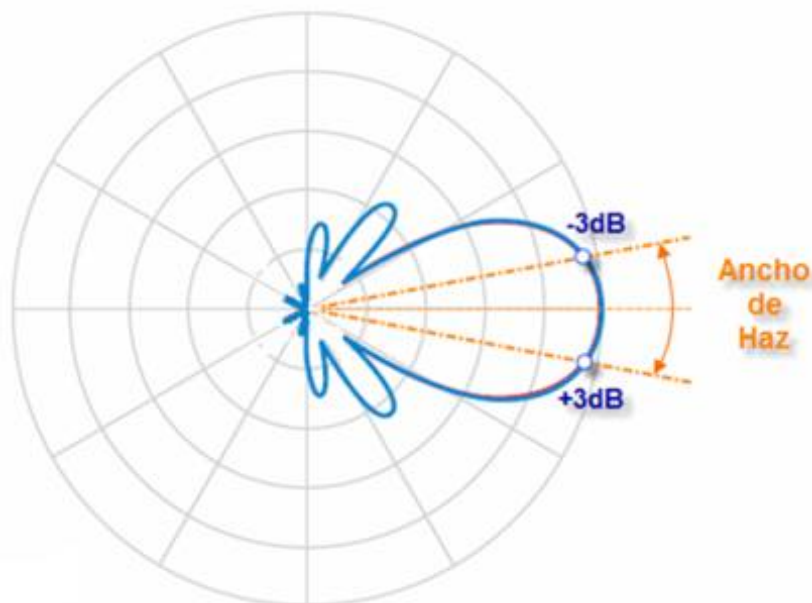


Figura 2.4: Ancho de Haz a -3 dB [4]

2.3.1.1. Lóbulos del Patrón de Radiación

Un patrón de radiación en cualquiera de sus representaciones, muestra un lóbulo principal. Además del lóbulo principal, el patrón puede exhibir varios lóbulos distintos, con diferentes máximos en diferentes direcciones, los cuales representan lóbulos secundarios, menores, laterales y posteriores. La figura 2.5 muestra un patrón polar tridimensional donde se presentan todos los tipos de lóbulos.

- **Lóbulo Principal:** Es el lóbulo que tiene la mayor concentración de potencia. Puede haber más de un lóbulo principal.
- **Lóbulo Menor:** Todos los demás lóbulos presentes en el patrón, excepto los principales.
- **Lóbulo Lateral:** Los lóbulos que se dirigen en una dirección diferente del previsto.
- **Lóbulo Posterior:** Lóbulo que se encuentra a 180 grados (dirección opuesta) respecto al principal.

Generalmente se desea que el patrón de una antena contenga solo un lóbulo principal lo más angosto posible, esto en la práctica es imposible, por lo que siempre se tendrán lóbulos menores, los cuales aparecen debido a la propia construcción de la antena. El objetivo siempre es

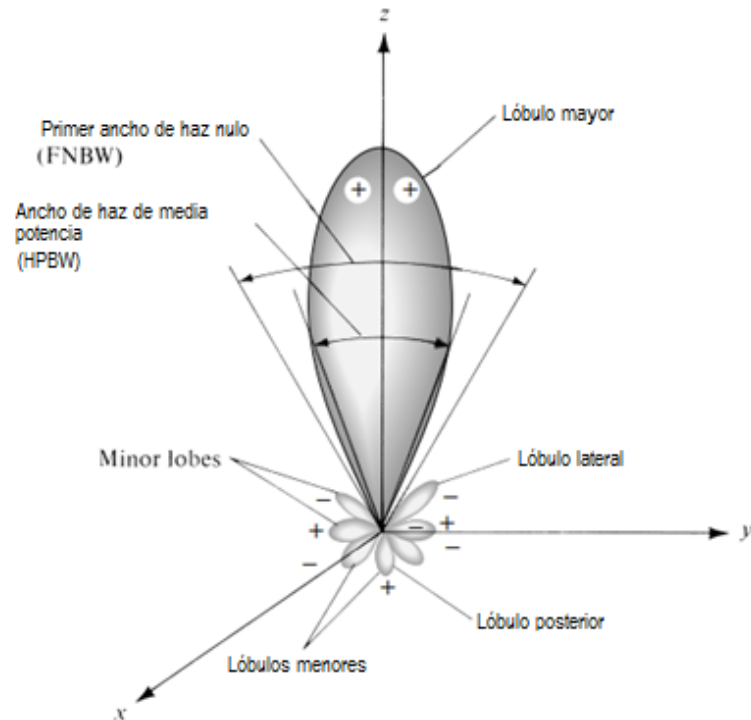


Figura 2.5: Lóbulos de radiación y ancho de haz de un patrón de una antena. [5]

minimizar estos lóbulos menores que son no deseados. Es deseable que los lóbulos laterales, en la mayoría de aplicaciones, estén atenuados (-20 dB)[5].

2.3.2. Regiones de Campo

Se definen tres tipos de regiones de campo que rodean una antena de acuerdo a las propiedades de cada campo. Éstas son:

- **Campo Cercano Reactivo:** Es el campo más cercano a la antena y el componente de campo que más irradia en esta zona es básicamente de tipo reactivo.
- **Campo cercano o Región de Fresnel:** El campo reactivo disminuye de tal forma que se hace insignificante en comparación con el campo de radiación. El patrón de radiación comienza a definirse.
- **Campo Lejano o Regio de Fraunhofer:** El patrón de radiación normalizado es prácticamente independiente de la distancia y el campo disminuye a $1/r^2$ [3].

La terminología de esta sección es la utilizada en [1]. Debido a que el patrón de radiación siempre se toma en relación a una zona lejana de la ubicación de la antena, es necesario tener un conocimiento básico de la misma. Si se considera una antena que se encuentra en el origen

de un sistema de coordenadas esféricas, el campo eléctrico irradiado en la zona lejana se expresa en la ecuación (2.1), donde se considera como insignificantes los campos cercanos.

$$\bar{E}(r, \theta, \phi) = [\hat{\theta}F_{\theta}(\theta, \phi) + \hat{\phi}F_{\phi}(\theta, \phi)] \frac{e^{-jk_0r}}{r} V/m \quad (2.1)$$

Donde \bar{E} representa el vector de campo eléctrico. θ y ϕ son vectores unitarios de un sistema de coordenadas esférico, r es la distancia radial desde el origen, y $k_0 = 2\pi/\lambda$ es la constante de propagación en el espacio libre. La longitud de onda está dada por $\lambda = c/f$. Las funciones de patrón F_{θ} y F_{ϕ} se interpretan que el campo eléctrico se propaga de dirección radial con una variación de fase de e^{-jk_0r} y una variación de amplitud con distancia de $1/r$. El campo eléctrico puede estar polarizado en θ o ϕ pero no en r debido a que es una onda TEM) [1].

En la ecuación 2.2 se representa en campo magnético en ϕ y en la ecuación 2.3 el campo en θ .

$$H_{\phi} = \frac{E_{\theta}}{\eta_0} \quad (2.2)$$

$$H_{\phi} = \frac{-E_{\phi}}{\eta_0} \quad (2.3)$$

Donde η_0 es la impedancia de onda del espacio libre. Por lo tanto, el vector de *Poynting* es: Ecuación 2.4.

$$\bar{S} = \{\bar{E} \times \bar{H}\} W/m^2 \quad (2.4)$$

El vector de tiempo *Poynting* promedio se expresa en la ecuación 2.5:

$$\bar{S}_{avg} = \frac{1}{2} Re\{\bar{S}\} = \frac{1}{2} Re\{\bar{E} \times \bar{H}\} W/m^2 \quad (2.5)$$

También se puede definir la distancia de campo lejano como la distancia donde el frente de onda esférico irradiado por una antena se convierte en una aproximación cercana al frente de fase planar ideal de una onda plana, por lo que depende de la dimensión máxima de la antena. Si llamamos a esta dimensión máxima D , entonces la distancia del campo lejano se define en la ecuación 2.6 [1].

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda} m. \quad (2.6)$$

Este criterio se basa en un error de fase máximo de $\pi/8$. En esta región, el patrón de campo es, en general, una función de la distancia radial y el componente del campo radial puede ser apreciable [5].

Para antenas que son muy pequeñas eléctricamente se utiliza una distancia mínima de campo lejano de $R_{FF} = 2\lambda$.

En la figura 2.6 se presenta un gráfico donde se muestra las diferentes regiones de campo y donde D representa la altura de la antena.

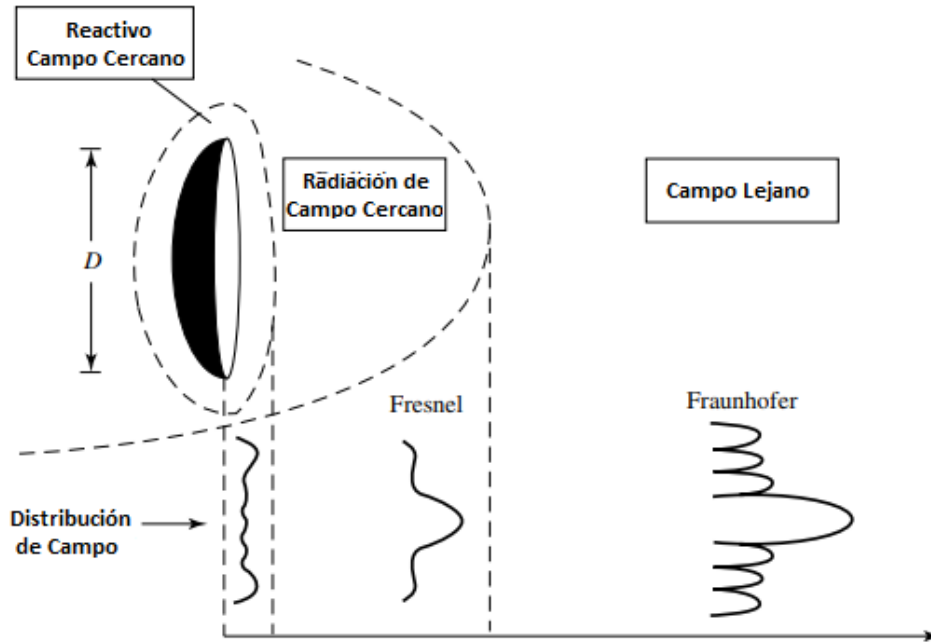


Figura 2.6: Regiones de Campo [6]

2.3.3. Densidad de Potencia de Radiación e Intensidad de Radiación

En la ecuación 2.5 se presentó el vector de Poynting el cual representa la densidad de potencia. Si integramos este vector sobre una superficie cerrada P , se obtendrá la potencia total que se representa en la ecuación 2.7:

$$P = \oint_S \vec{S} \cdot d\vec{s} = \oint_S \vec{S} \cdot \hat{n} \cdot da \quad (2.7)$$

La intensidad de radiación del campo electromagnético radiado se presenta en la ecuación 2.8. Esta magnitud representa la variación en la potencia radiada en relación con la posición alrededor de la antena.

$$U(\theta, \phi) = r^2 |\bar{S}_{avg}| = \frac{r^2}{2} \text{Re}\{E_\theta \hat{\theta} \times H_\phi^* \hat{\phi} + E_\phi \hat{\phi} \times H_\theta^* \hat{\theta}\} = \frac{r^2}{2\eta_0} [|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2] = \frac{1}{2\eta_0} |F_\theta|^2 + |F_\phi|^2 W \quad (2.8)$$

Utilizando la ecuación 2.7 e integrándola sobre una esfera de radio r que encierra la antena se puede obtener la potencia total irradiada por una antena, la cual se presenta en la ecuación 2.9.

$$P_{rad} = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \bar{S}_{avg} \cdot \hat{r} r^2 \sin\theta d\theta d\phi = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} U(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.9)$$

La densidad de potencia de radiación se define en la ecuación 2.10 que viene dado en W/m^2 :

$$W_{rad} = \frac{U}{r^2} \quad (2.10)$$

Utilizando las ecuaciones 2.9 y 2.10 se puede obtener la densidad de potencia para una antena isotrópica, la cual se presenta en la ecuación 2.11

$$W_0 = \hat{a}_r \left(\frac{P_{rad}}{4\pi r^2} \right) \quad (2.11)$$

Donde \hat{a}_r representa el vector unitario radial.

Por lo tanto, la intensidad de radiación para una antena isotrópica esta definida por la ecuación 2.12:

$$U_0 = \hat{a}_r \left(\frac{P_{rad}}{4\pi r^2} \right) \quad (2.12)$$

2.3.4. Ancho de Banda

Se define como aquel margen de frecuencias en el que la ganancia de la antena no decae de un cierto valor respecto al máximo valor[37]. El ancho de haz más utilizado es el HPBW (Ancho de Haz de Media Potencia), el cual se define como la separación angular donde la antena radía el 50 por ciento del total de potencia. También hay el FNBW (Ancho de Haz de los primeros nulos) que es la separación angular donde se ocasionan los primeros nulos. Estos ancho de banda se presentan en la figura 2.7.

2.3.5. Directividad

Se define como directividad de una antena a la relación que hay de la intensidad de radiación en una dirección dada (potencia por unidad de ángulo sólido) a la intensidad de radiación promediada en una esfera. La intensidad de radiación promediada (U_0) se encuentra definida en la ecuación 2.12, lo que especifica que la intensidad de campo es la misma en toda la superficie de la esfera que encierra la antena. Por lo tanto, la ecuación de la directividad se presenta en la ecuación 2.13:

$$D = D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_0} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (2.13)$$

Si la dirección de la intensidad de radiación no está dada, entonces la directividad está dada

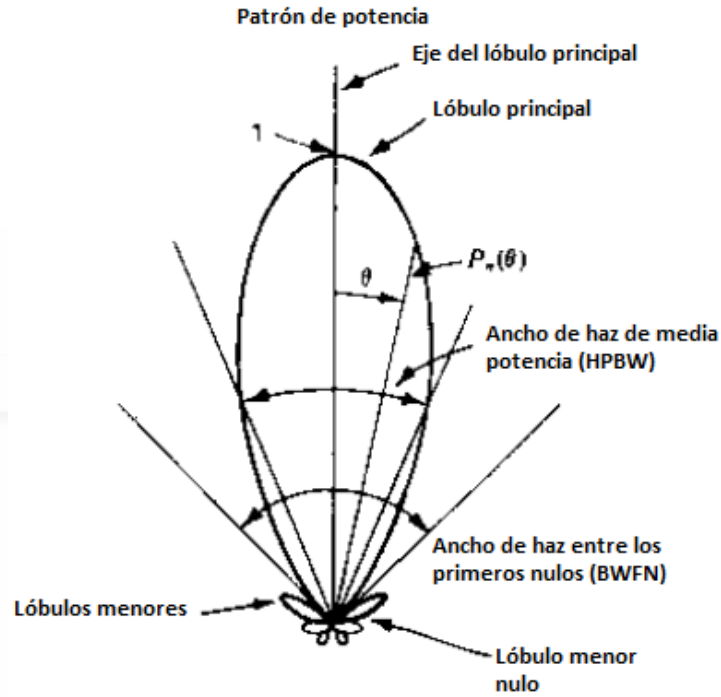


Figura 2.7: Ancho de Banda (HPBW y FNBW) [7]

por la ecuación (2.14):

$$D_0 = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.14)$$

2.3.6. Eficiencia de una Antena

Se puede definir a la eficiencia de una antena como la relación que hay entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena. Con este valor se puede determinar las pérdidas que se ocasionan en la propia antena debido a su estructura como defectos en su superficie, su propia resistencia, entre otros. Las pérdidas pueden deberse a [5]:

- Reflexiones debido al desajuste entre la línea de transmisión y la antena.
- Pérdidas I^2R (conducción y dieléctrico).

En forma matemática la eficiencia se presenta en la ecuación 2.15:

$$e = \frac{P_r}{P_{in}} \quad (2.15)$$

La eficiencia también se puede representar en términos de pérdidas en la antena, su forma

matemática se presenta en la ecuación 2.16 [5]:

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2.16)$$

Donde:

- e_0 = Eficiencia total (adimensional)
- e_r = Eficiencia de reflexión
- e_c = Eficiencia de conducción (adimensional)
- e_d = Eficiencia del dieléctrico (adimensional)

La eficiencia de reflexión se presenta en la ecuación 2.17:

$$e_r = (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.17)$$

Donde Γ es el coeficiente de reflexión de voltaje en la entrada de los terminales de la antena [5] y depende de la impedancia de entrada Z_{in} y de la impedancia característica de la línea de transmisión Z_0 (ecuación 2.18)

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.18)$$

Un valor que permite conocer la respuesta en frecuencia de la antena es el de la razón de onda estacionaria (ROE) de tensión (**VSWR** *voltage standing wave ratio*). Este valor se define como la relación entre la tensión mínima y máxima en la entrada de la línea de la antena. Mientras que el módulo del coeficiente de reflexión Γ va de 0 a 1, el **VSWR** va de 1 a infinito, resultando una medida más sensible a la adaptación [8]. La relación del coeficiente de reflexión está relacionado con el **VSWR** en la ecuación 2.19.

$$VSWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (2.19)$$

Debido a que el coeficiente de reflexión depende de la frecuencia, la antena funcionará bien si el **VSWR** se acerca a 1 en un rango de frecuencias e irá aumentando de valor a medida que se aleje de esa banda. Algunas antenas trabajan bien en varias bandas de frecuencia. El diagrama de **VSWR** de una antena comercial se muestra en la figura 2.8.

La pérdida de retorno PR es una medida de la energía reflejada de una señal transmitida. Las reflexiones se producen debido a una mala adaptación de impedancias por culpa del conector, de un estado defectuoso del cable, una mala fabricación o una carga inapropiada. Se expresa en la ecuación 2.20:

$$PR = -20 \log |\Gamma| \quad (2.20)$$

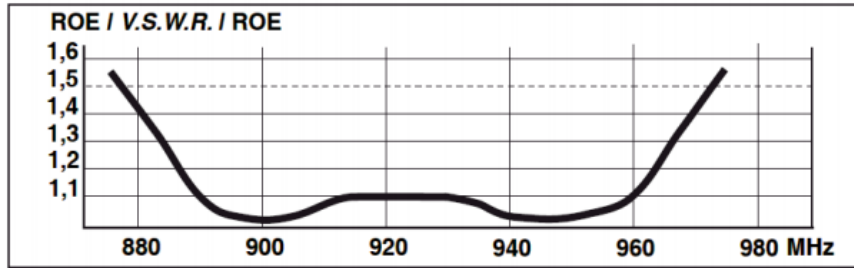


Figura 2.8: VSWR para una antena comercial omnidireccional para GSM (890-960 MHz) [8]

2.3.7. Ganancia

La ganancia de una antena es una medida útil; depende tanto de la directividad como de la eficiencia de la antena. La ganancia de una antena (en una dirección dada) se define como “la relación de la intensidad, en una dirección dada, a la intensidad de la radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena se irradiara isotrópicamente [5]. La ecuación 2.21 muestra la forma matemática de la ganancia:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta\phi)}{P_{in}} (\text{adimensional}) \quad (2.21)$$

Donde:

- G : Representa la ganancia
- $U(\theta, \phi)$ Intensidad de Radiación
- P_{in} Potencia de entrada

En la ecuación 2.16 se considera la eficiencia total de reflexión de conducción y del dieléctrico. Sin embargo e_c y e_d son difíciles de calcular e incluso por medidas no se pueden separar [5]. Por lo tanto, estas medidas se expresan en conjunto, como se muestra en la ecuación 2.22[5]:

$$e_{cd} = e_c e_d \quad (2.22)$$

La ganancia absoluta es una medida que se utiliza más que la directividad, debido a que ésta toma en cuenta las pérdidas reales que se producen en una antena. La expresión matemática de la ganancia absoluta se presenta en la ecuación 2.23 :

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.23)$$

Donde se ha tomado en cuenta que la potencia de entrada está relacionada con la potencia de radiación, como indica la ecuación 2.24 [5]:

$$P_{rad} = e_{cd}P_{in} \quad (2.24)$$

Si utilizamos la ecuación 2.14 de la directividad y la reemplazamos en la ecuación 2.24, se obtiene la relación de la ganancia con la directividad como se muestra en la ecuación 2.25:

$$G(\theta, \phi) = e_{cd}D(\theta, \phi) \quad (2.25)$$

2.3.8. Polarización

La polarización electromagnética, en una determinada dirección, es la figura geométrica que traza el extremo del vector campo eléctrico a una cierta distancia de la antena, al variar el tiempo [10]. La polarización puede ser lineal, circular y elíptica. La polarización lineal puede tomar distintas orientaciones (horizontal, vertical, $+45^\circ$, -45°), las polarizaciones circular o elíptica pueden ser a derechas o izquierdas (dextrógiras o levógiras), según el sentido de giro del campo (observado alejándose desde la antena) [10].

2.3.9. Reciprocidad de una Antena

La antena es un dispositivo recíproco; esto significa que el comportamiento de una antena en la transmisión tiene las mismas propiedades que en la recepción. Es decir, una antena transmite una señal desde la guía de onda hacia el espacio libre con la misma eficacia como recibe una señal del espacio libre y la transfiere a la guía de onda.

El teorema de reciprocidad se usa en la práctica con el fin de obtener el patrón de radiación de una antena en modo recepción. El patrón obtenido es el mismo que en el modo transmisión; siempre y cuando los materiales utilizados para las antenas, las fuentes RF y los medios de propagación de la onda sean lineales y además que los modos de transmisión y recepción sean compatibles con la polarización [5]. La reciprocidad se cumplirá independientemente de los tamaños de las antenas o de la coincidencia con sus correspondientes líneas de alimentación o cargas.

La demostración de la reciprocidad para la obtención del patrón de radiación de una antena se demostrará a continuación. La demostración completa fue obtenida de [5].

Tómese como referencia la figura 2.9 (a) y (b) donde se tiene dos antenas. Una antena de prueba (1) y una antena de sonda (2). Los voltajes y corrientes V_1, I_1 en los terminales 1-1 de la antena número 1 y V_2, I_2 en los terminales 2-2 de la antena número 2 están relacionados por las ecuaciones 2.26 y 2.27:

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \quad (2.26)$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \quad (2.27)$$

Donde:

- Z_{11} representa la impedancia propia de la antena 1
- Z_{22} representa la impedancia propia de la antena 2
- Z_{11}, Z_{21} representa la impedancia mutua entre las antenas 1 y 2

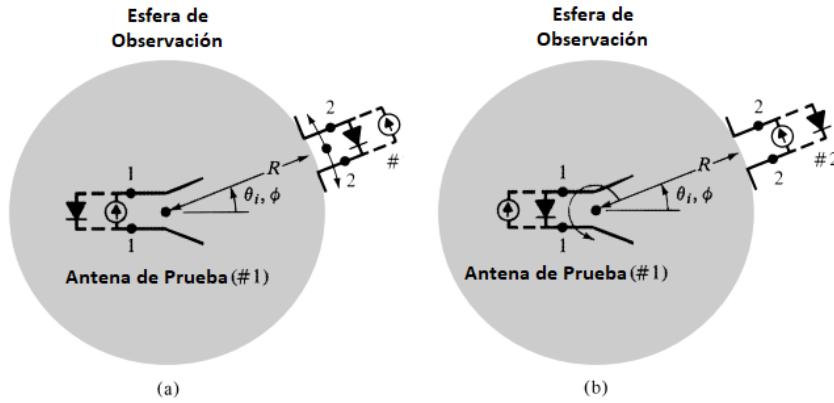


Figura 2.9: Disposición de antenas para mediciones de patrones y teorema de reciprocidad. [5]

Si se aplica una corriente I_1 en los terminales 1-1 y el voltaje V_2 (designado como V_{2oc}) se mide en los terminales abiertos ($I_2 = 0$) de la antena 2, entonces se medirá una tensión igual a (V_{1oc}) en los terminales abiertos ($I_1 = 0$) de la antena 1, siempre que la corriente (I_2) de la antena 2 sea igual a (I_1). Por lo tanto se puede escribir las ecuaciones 2.28 y 2.29:

$$Z_{21} = \left(\frac{V_{2oc}}{I_1} \right) |_{I_2=0} \quad (2.28)$$

$$Z_{12} = \left(\frac{V_{1oc}}{I_2} \right) |_{I_1=0} \quad (2.29)$$

Si el medio entre las dos antenas es lineal, pasivo, isotrópico y las ondas son monocromáticas, entonces debido a la reciprocidad se puede escribir la ecuación 2.30.

$$Z_{21} = \left(\frac{V_{2oc}}{I_1} \right) |_{I_2=0} = \left(\frac{V_{1oc}}{I_2} \right) |_{I_1=0} = Z_{12} \quad (2.30)$$

Si además $I_1 = I_2$, entonces se cumple la ecuación 2.31.

$$V_{2oc} = V_{1oc} \quad (2.31)$$

Lo anterior es válido para cualquier posición y cualquier configuración de operación entre las dos antenas, inclusive la reciprocidad se mantiene si cualquiera de las antenas 1 y 2 se mueve sobre una superficie de una esfera de radio constante [5].

2.3.10. Tipos de Antenas

Las antenas son una parte fundamental en un sistema de comunicaciones inalámbrico. Existen varios tipos de antenas ver figura 2.10, los cuales dependen de la aplicación o de la banda de frecuencia a utilizarse. Por ejemplo las antenas que se utilizan en WiFi necesitan ser omni-direccionales y transmitir la misma potencia en todas las direcciones, en cambio, las antenas satelitales necesitan dirigir su haz hacia una dirección específica del espacio. En unos casos deben expandir en lo posible la potencia radiada, es decir, no deben ser directivas otras veces deben serlo para canalizar la potencia en una dirección y no interferir a otros servicios como estaciones de radioenlaces.

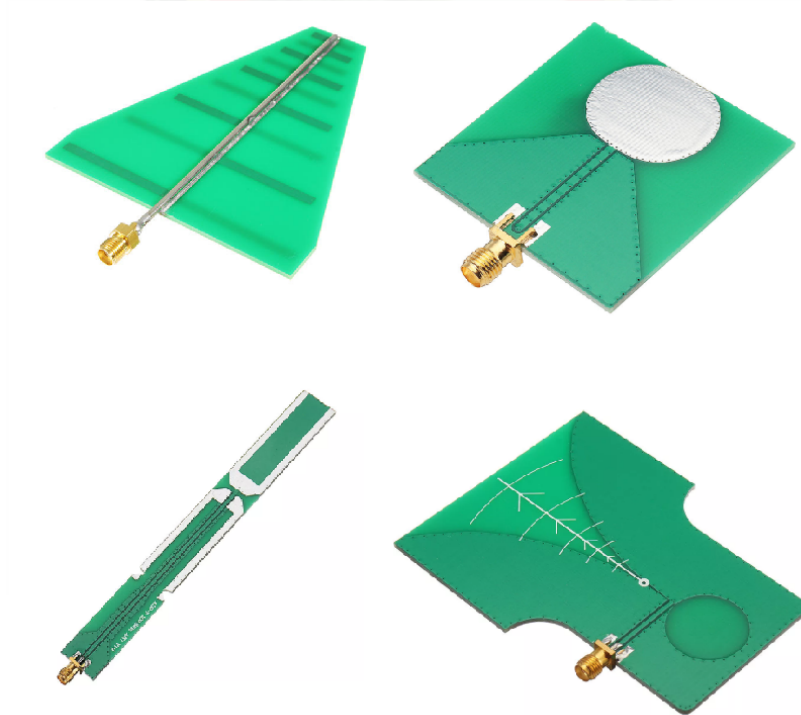


Figura 2.10: Diversas antenas comerciales [9]

2.3.10.1. Antenas de Hilo

Son antenas cuyo elemento radiante está conformado por conductores de hilo con un diámetro mucho menor que una longitud de onda. Puede adquirir varias formas, desde hilos rectos, espirales o cualquier otra forma. En la figura 2.11 se muestran distintos tipos de antenas hilo. En este tipo de antenas se encuentran las antenas dipolo, las espirales, las helicoidales, entre otras y son muy utilizadas en antenas receptoras de tv o de radio. Las bandas donde se las utiliza son: MF, HF, VHF y UHF.

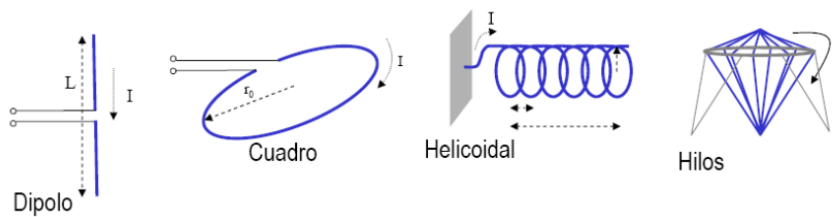


Figura 2.11: Distintos tipos de antena hilo. [10]

El dipolo de media longitud de onda es uno de los más estudiados de este tipo de antenas y consiste en hilo conductor fabricado comúnmente de aluminio o de cobre. El patrón de radiación vertical y horizontal se presentan en la figura 2.12:

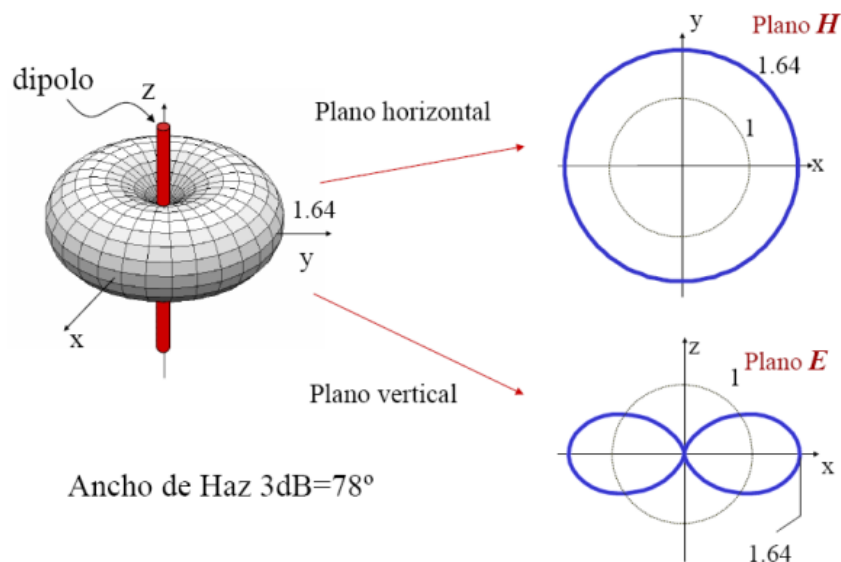


Figura 2.12: Diagrama de radiación de un dipolo en el plano horizontal y vertical. [10]

2.3.10.2. Antenas Yagi-Uda

Este tipo de antenas fue inventada por Shintaro Uda y Hidetsugo Yagi ambos de la Universidad Imperial de Tohoku. Esta invención de quitar la tierra, produjo una antena de muy alto rendimiento mediante una estructura simple de dipolo combinado con elementos parásitos, conocidos como reflector y directores [11].

La antena Yagi-Uda esta construida mediante dipolos de media onda, elementos directores, activos y reflectores (figura 2.13). Gracias a su acople de antenas de media onda y sus elementos directores, se logra concentrar el haz en una sola dirección haciéndola altamente directiva. Su directividad aumenta mientras mayor sea el número de elementos pasivos.

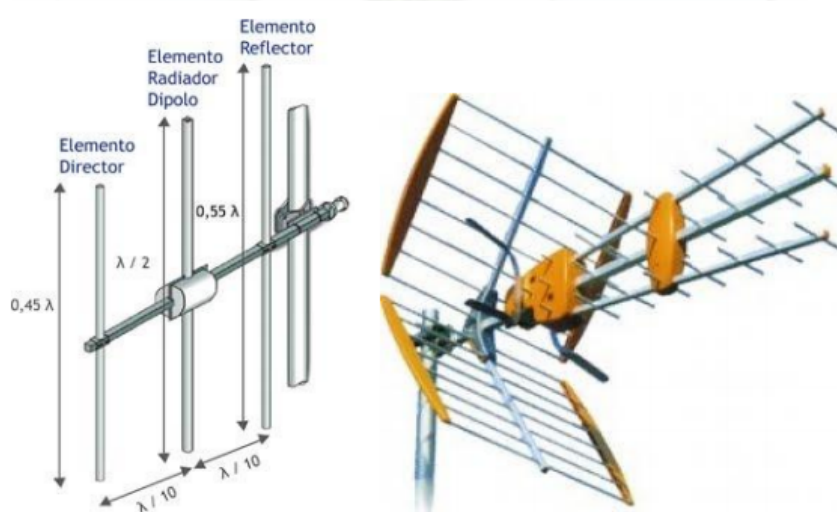


Figura 2.13: Antena Yagi-Uda. [10]

Gracias a su directividad, esta antena es ampliamente usada en recepción de señales de televisión en la banda de UHF, en bandas de microondas y por radioaficionados. Ésta logra disminuir la interferencia no deseada tanto en la transmisión como en la recepción. En la figura 2.14 se muestra un gráfico del patrón de radiación polar de una antena Yagi-Uda, donde se nota la alta directividad que posee.

2.3.10.3. Antenas Microstrip

Microstrip es una línea de transmisión para microondas que consiste en un material dieléctrico con una película metálica que forma una tira conductora. Las antenas microstrip están diseñadas de tal forma que su estructura disipe la potencia en forma de radiación. Son muy direccionales debido a que radian su potencia hacia una sola dirección tanto vertical como horizontal. En la figura 2.15 se puede observar el patrón de radiación horizontal (a) y vertical (b) de una antena

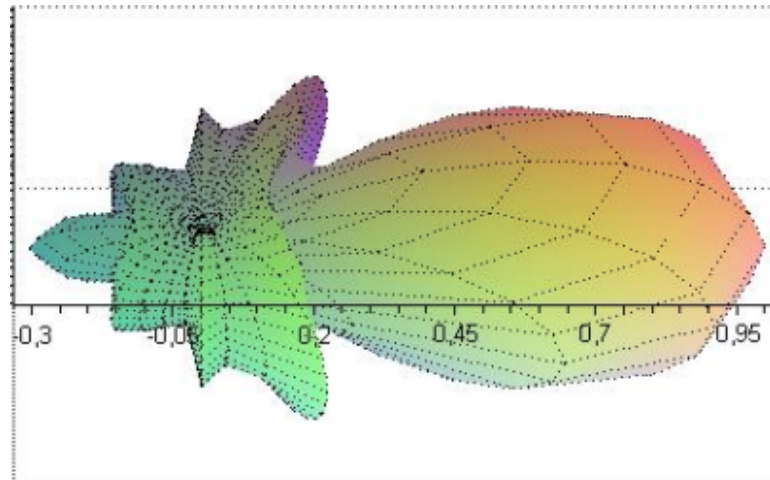


Figura 2.14: Patrón de Radiación 3D polar de una antena Yagi-Uda. [11]

microstrip, donde se observa su directividad.

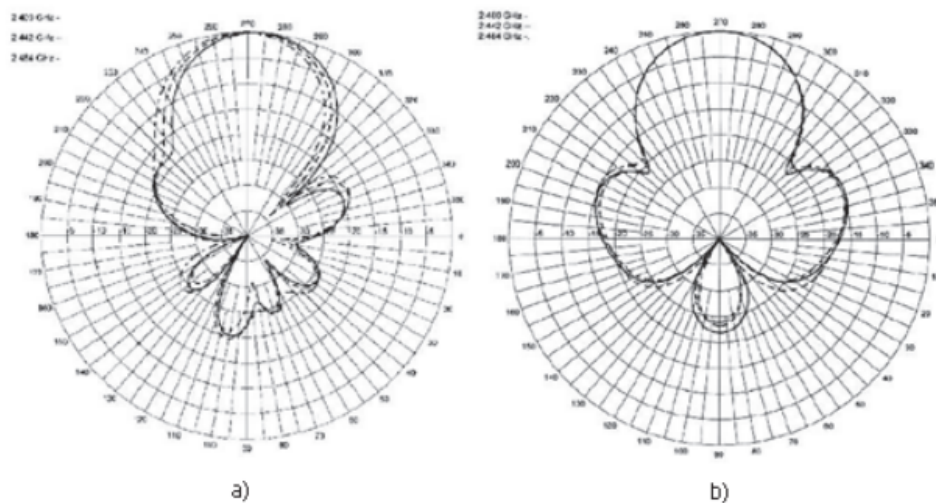


Figura 2.15: Patrón de radiación horizontal y vertical. [12]

Las antenas microstrip al ser una tecnología plana, facilita su integración con el resto del sistema, favoreciendo la reducción del tamaño y peso global, aunque tiene la desventaja de su estrecho ancho de banda; sin embargo, actualmente existen numerosos métodos para solventar este inconveniente [10].



Capítulo 3

Aspectos Teóricos Adicionales

Se revisan aspectos teóricos, fundamentos y metodologías aplicadas en detectores de radiofrecuencia. Luego se describen los detectores [RMS](#) y [LOG](#), se detalla un procedimiento realizado del ajuste polinomial de la función de transferencia realizado a los detectores [RMS](#) y [LOG](#). Se tratarán algunos aspectos relacionados con filtros en alta frecuencia y amplificadores de bajo ruido ([LNA](#)).



3.1. Introducción

La necesidad de medir de manera precisa y eficiente la potencia de radiofrecuencia recibida o campo recibido, ha llegado a ser crucial para la obtención de un rendimiento óptimo de los sistemas y componentes de comunicación.

En un mundo más interconectado por radio, el análisis y caracterización óptimos de los elementos que constituyen un sistema de radiofrecuencia, el uso de herramientas que permitan trabajar y analizar las señales captadas se ha vuelto muy importante y es un referente de tecnología avanzada y relativamente compleja. Entre las herramientas utilizadas, se encuentran: detectores de radiofrecuencia, analizadores de espectros, entre otros.

Estas herramientas permiten captar una señal en un amplio rango de frecuencias que va desde los KHz hasta los GHz. En el trabajo realizado, se utiliza un detector de radiofrecuencia en un rango de frecuencia de 1 MHz hasta los 4 GHz. Un parámetro muy importante que se analizó en los detectores es la sensibilidad.

Por otro lado, es importante señalar que en base a los resultados obtenidos con los detectores utilizados, se puede realizar un estudio complejo de una señal; como por ejemplo: patrones de radiación, solapamiento de señales al radiar varias antenas al mismo tiempo.

En este capítulo se analizará primero el método general para la obtención del patrón de radiación de antenas. Posteriormente se revisan algunos aspectos como métodos de detección, características de los detectores, los tipos de detectores que existen en el mercado; las ventajas, desventajas y los usos que se les puede dar, gracias a que existe una amplia variedad.

3.2. Medición de Potencia en Ondas de Radio Frecuencia

Si consideramos todos los sistemas de RF, la potencia que se puede medir puede clasificarse en tres tipos: potencia media, potencia de pulso y potencia pico de envolvente (figura 3.1). Para sistemas de RF de comunicaciones, la que se utiliza generalmente es la potencia media. Los otros tipos de potencia se utilizan en sistemas como radares y equipos de navegación.

3.2.1. Potencia Media

La potencia media se define como la velocidad de transferencia de energía promediada sobre muchos períodos de la frecuencia más baja presente en la señal [13]

En señales moduladas como amplitud modulada (AM) la potencia se promedia contemplando varios ciclos. la expresión matemática de la potencia media [13] se muestra en la ecuación 3.1

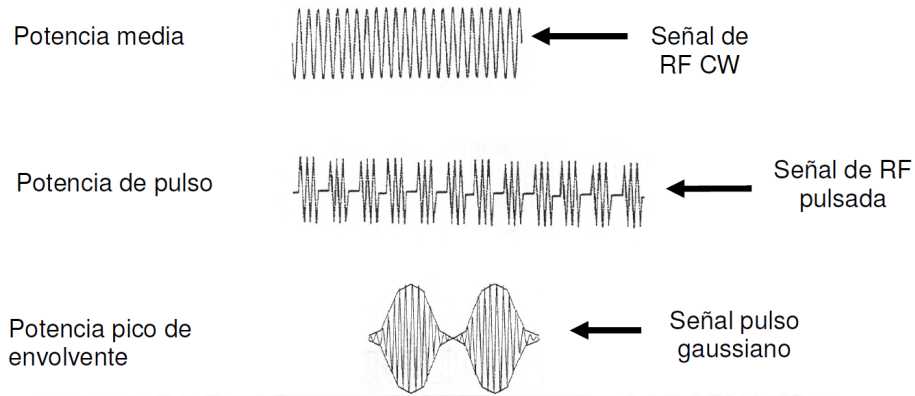


Figura 3.1: Tipos de medición de potencia [13]

$$P_{avg} = \frac{1}{nT_1} \int_0^{T_1} e(t)i(t)dt \quad (3.1)$$

donde:

T_1 : Periodo de la componente de menor frecuencia de $e(t)$ e $i(t)$.

n : Número de ciclos

3.2.2. Potencia de Pulso

La potencia de pulso se mide en señales que se transmiten por intervalos de tiempo cortos. Ejemplos de estas señales son las utilizadas en radares para exploración y medidores de velocidad. Para la potencia de pulso o potencia pulsada, la tasa de transferencia de energía es promediada en el ancho de pulso [13]. Matemáticamente, la potencia de pulso se calcula utilizando la ecuación 3.2.

$$P_p = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e(t)i(t)dt \quad (3.2)$$

donde:

τ : Es el ancho de pulso de la onda de RF.

Para señales más simples y que mantienen una frecuencia constante, la expresión se puede simplificar y calcularse con la ecuación 3.3 [13]:

$$P_p = \frac{P_{avg}}{\tau f_r} \quad (3.3)$$

Donde el ciclo de trabajo es la frecuencia multiplicada por ancho de pulso. En la figura 3.2 se

muestra una onda pulsada en la cual se muestran los parámetros de medición.

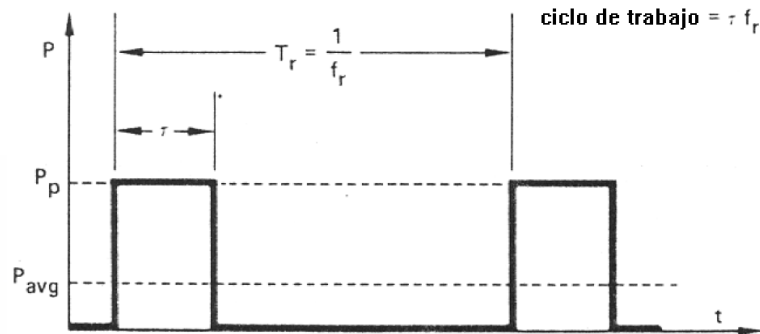


Figura 3.2: Onda tipo pulsada y parámetros de potencia medidos [13]

3.2.3. Potencia Pico de Envolvente

Cuando las señales de RF son complejas o pertenecen a aplicaciones específicas y contienen peculiaridades como aberraciones que son diferencias de fase, la potencia de la señal no puede ser calculada directamente con los métodos anteriores. En la figura 3.3, se muestra una señal modulada de alta frecuencia. El cálculo de potencia debe realizarse mediante la potencia pico de envolvente, la cual se obtiene mediante el promedio de la potencia durante un tiempo mayor comparado con el periodo de la frecuencia más alta de modulación, pero corto en comparación con el periodo de la portadora [14].

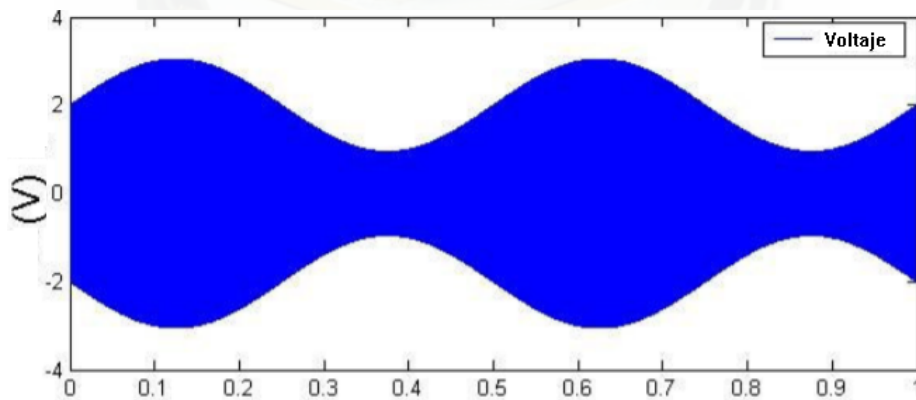


Figura 3.3: Señal Modulada de alta frecuencia [14]

La figura 3.3 muestra la envolvente de voltaje de una señal modulada de alta frecuencia. La figura 3.4 muestra la envolvente de potencia instantánea de esta señal en azul y la potencia de la envolvente en rojo. La potencia de la envolvente se mide promediando la potencia durante un

período de tiempo que es largo en comparación con el período de la frecuencia de modulación más alta, pero corto en comparación con el período de la portadora. Esto permite examinar los efectos de la modulación o las condiciones transitorias sin examinar los detalles de la forma de onda de la portadora de RF. El pico de la potencia de la envolvente se mide como potencia de pico mediante un medidor de potencia de pico y es una medida de la potencia de señal máxima.

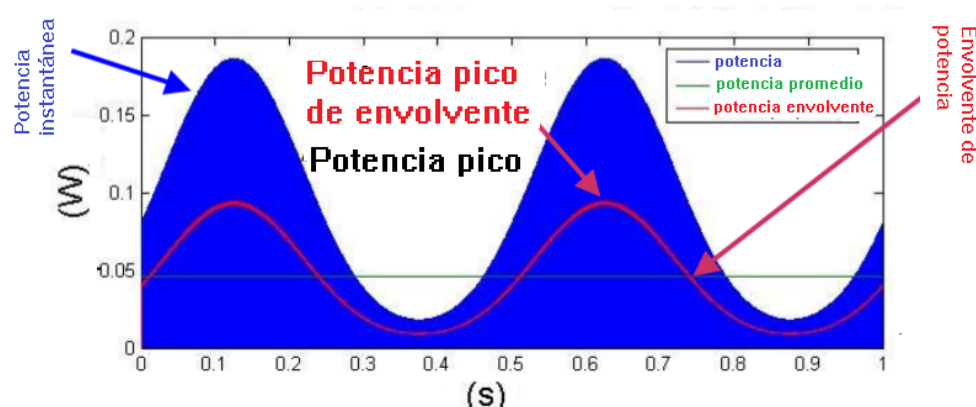


Figura 3.4: Potencia de señal modula en alta frecuencia [14]

3.3. Detectores de Potencia de RF

Para medir la potencia media de una onda RF los métodos comúnmente utilizados son:

1. Termistor
2. Termocupla
3. Diodo detector

El detector de potencia por diodo detector es el método implementado en el presente trabajo de titulación.

El diagrama de la figura 3.5 muestra el método básico de medición de potencia de una onda de radiofrecuencia, en el cual se utiliza un sensor, que convierte la potencia media de la señal en un equivalente en corriente continua o en una señal de frecuencia más baja, permite una medida por un equipo que muestra al usuario el valor de la potencia en dBm o en vatios.

3.3.1. Método de detección por Termistores

Los termistores fueron los primeros sensores utilizados para medir la potencia de ondas de radiofrecuencia, pero en su mayoría han sido reemplazados por sensores de termocupla y diodos; sin embargo, su ámbito de uso sigue disponible en metrología, específicamente en estándares

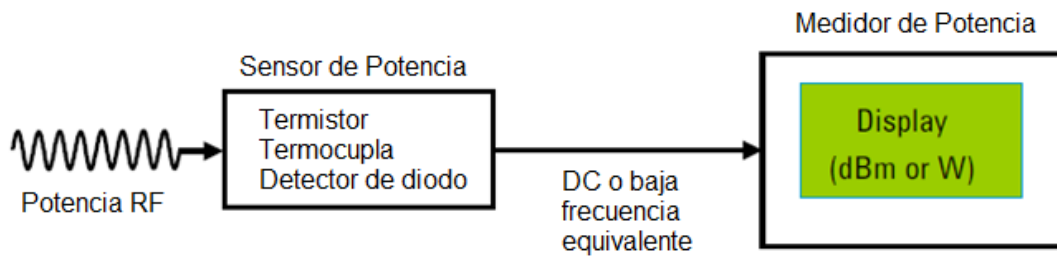


Figura 3.5: Diagrama de bloques para medición de potencia de una señal RF [15]

de transferencia para mediciones de potencia debido a su alto desempeño de conversión de corriente continua.

Un termistor es un tipo de resistor cuya resistencia cambia significativamente en función de la temperatura, construido usualmente con compuestos metálicos. Pueden tener un coeficiente de temperatura positivo (PTC) o coeficiente de temperatura negativo (NTC), lo cual dictamina si la resistencia del dispositivo disminuye o aumenta según la temperatura. En la figura 3.6, se muestra la curva característica de resistencia en función de la temperatura de termistores tipo PTC o NTC.

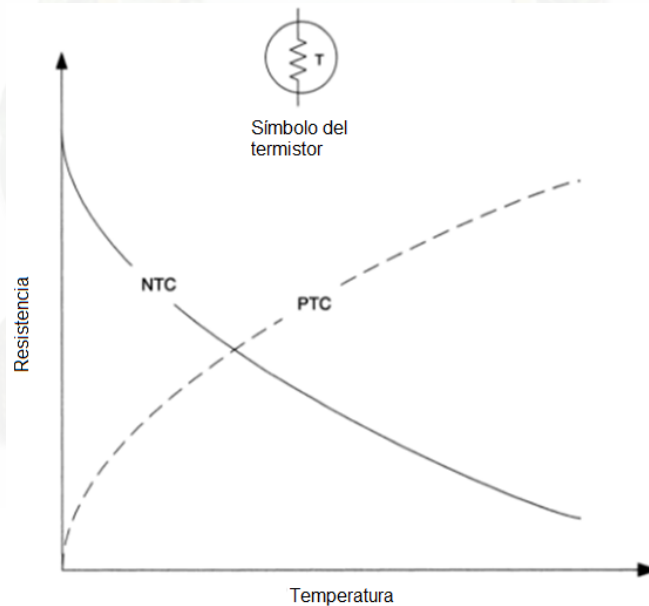


Figura 3.6: Comportamiento de la resistencia ante cambio de temperatura en termistores NTC y PTC [16]

Debido a que el termistor es un resistor básicamente, la corriente que circula a través del mismo

ocasiona un auto-calentamiento del dispositivo.

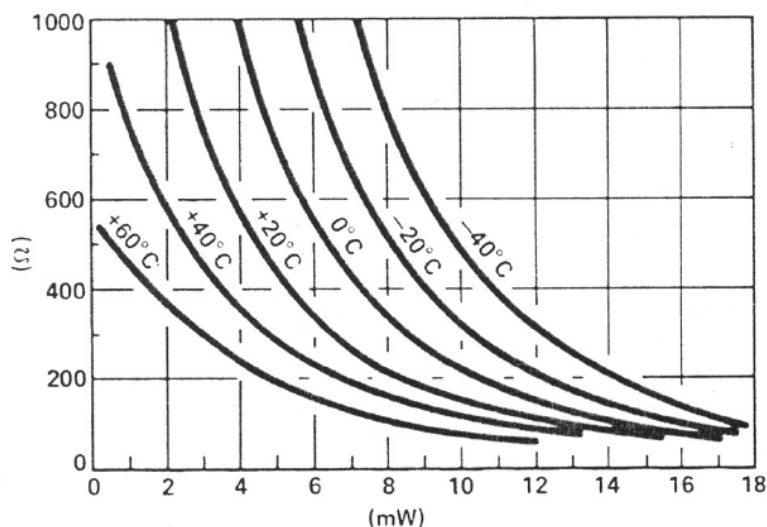


Figura 3.7: Gráfica Potencia-Resistencia de un termistor [16]

En la figura 3.7, se muestra la relación potencia y resistencia de un termistor. Se aprecia que la respuesta del dispositivo no es lineal y, además, cambia de forma y pendiente en función de la temperatura. Las mediciones de potencia de una onda RF en un termistor no pueden ser realizadas directamente. Para salvar este inconveniente, se utiliza el método bolométrico.

3.3.1.1. Método Bolométrico

El método bolométrico [17], es un método que utiliza sensores de potencia conocidos como bolómetros, que varían su resistencia cuando detectan una variación en la temperatura.

Existen dos tipos de bolómetros. El primero se lo conoce como barretters o barreteres y el otro de termistores. El tipo barreteres es un fragmento muy corto y delgado de alambre, generalmente de Wollastron de 1 μm de diámetro, (similar a un fusible). Posee un coeficiente de temperatura positivo.

La resistencia del barreter depende de las características físicas y dimensionales, es decir, se los suele fabricar de tal forma que, su rango de variación se encuentre entre los 100 y 400 Ω , con un rango de temperatura que va desde los 100 y 200 $^{\circ}\text{C}$.

En la figura 3.8 se observa el bolómetro compuesto con barreteres:

La característica de *Resistencia/Potencia* sigue la ecuación 3.4:

$$R - R_0 = JP^n \quad (3.4)$$

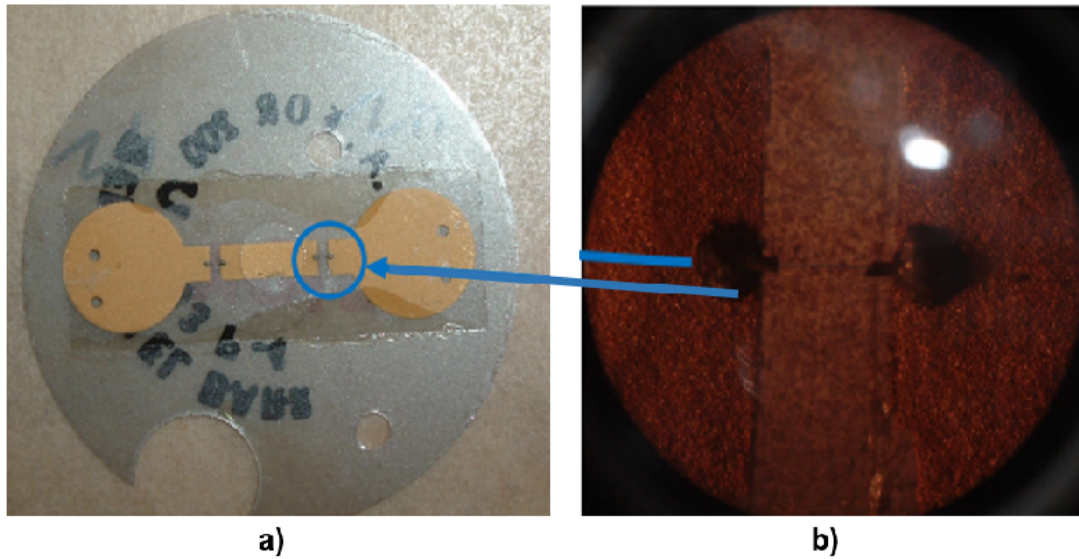


Figura 3.8: a) Elemento bolométrico coaxial formado por un sustrato de mica y dos alambres de Wollastron. b) Ampliación de elemento barretter [17]

donde:

R: Resistencia de barretter a la potencia P

n: 0,9 (es casi lineal con la potencia)

R_0 y J: Son Constantes

Es importante mencionar que la sensibilidad está dada por la pendiente de la curva, con valores que van entre 5 y 10 $\frac{\Omega}{mW}$. Gracias a su tamaño reducido, la constante de tiempo τ maneja valores entre 100 y 400 μs . En la figura 3.9 se aprecia el comportamiento de un barretter en una temperatura de 20°C.

Los barretters fueron los primeros en emplearse como sensores de potencia. Debido a que su punto de trabajo se realizaba casi al límite, para poder presentar variaciones máximas en resistencia, no toleran transitorios.

El otro tipo de bolómetros son los que están compuestos por termistores. Para el caso de detección de radiofrecuencia se utiliza un termistor tipo NTC, en el que la resistencia disminuye inversamente proporcional con el aumento de la temperatura. En la figura 3.10 se aprecia el termistor NTC. Maneja un tiempo de respuesta de 100 ms y es mucho más robusto, lo cual se convierte en una ventaja sobre los barretters. Por otro lado, la característica de *Resistencia / Potencia* sigue la ecuación 3.5:

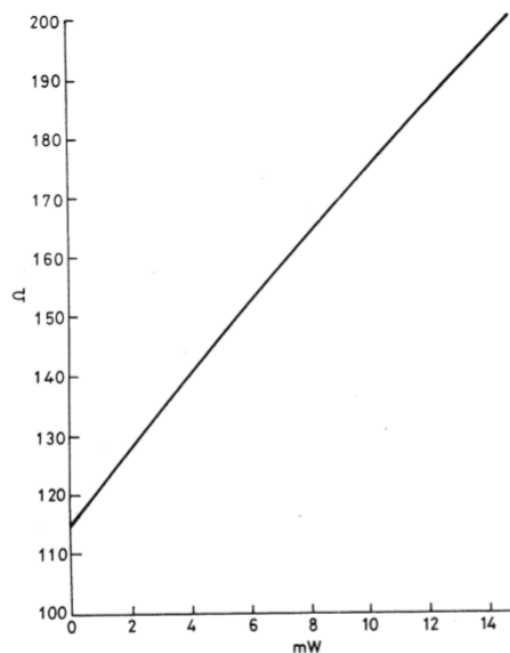


Figura 3.9: Curva de un barretter para $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [17]

$$R = J e^{\left[\frac{B}{K+CP}\right]} \quad (3.5)$$

donde:

R: Resistencia

P: Potencia

J, B, K, C: Son Constantes



Figura 3.10: Termistor NTC [17]

La figura 3.7 en la página 29, presenta el comportamiento de los termistores a temperatura ambiente. Como se puede observar, las curvas no son lineales y esto puede variar entre diferentes

termistores. Esto se debe a que generalmente los termistores se los construye para que trabajen en un rango de 100 y 300 Ω , a una temperatura de 100°C y pueda medir una potencia máxima de 10 mW.

Debido al funcionamiento mencionado anteriormente, el termistor no mantiene una respuesta lineal. Para linealizar la respuesta del mismo se utiliza un circuito de puente de **Wheatstone**¹, el cual realiza un balance de la temperatura interna del termistor y entrega únicamente la componente de DC causada por la fuente externa. En la figura 3.11 se muestra el circuito que se utiliza para esta medición. Para obtener la respuesta deseada, el circuito debe cumplir con la condición mostrada en la Ecuación 3.6 [17]:

$$\frac{R_1}{R_T} = \frac{R_2}{R_3} \quad (3.6)$$

donde:

R_T : Resistencia del termistor

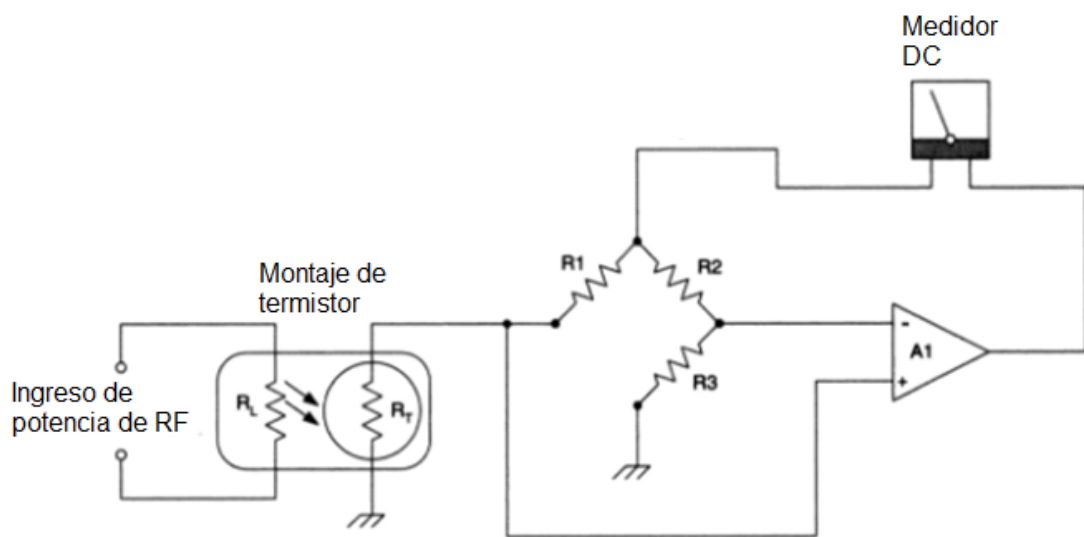


Figura 3.11: Método de medición de potencia con bolómetro y puente de Wheatstone [15]

¹Wheatstone, es un circuito eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida.

3.3.2. Método de Detección por Termocupla

Este método de detección de potencia [18] alcanza mayores rangos de frecuencia y mejora la exactitud en la medición en comparación con el método analizado anteriormente.

Las termocuplas son dispositivos compuestos por la unión de dos metales que generan un voltaje en función de la temperatura. El punto de unión se conoce como juntura. Para la medición de potencia, se aprovecha que la temperatura es directamente proporcional a la potencia RF incidente sobre la termocupla. Para asegurar que la medición sea exacta se utiliza una segunda juntura que se mantiene a temperatura constante, la cual se conoce como unión o junta fría. En la figura 3.12 se muestra el circuito utilizado para la medición de RF con termocuplas.

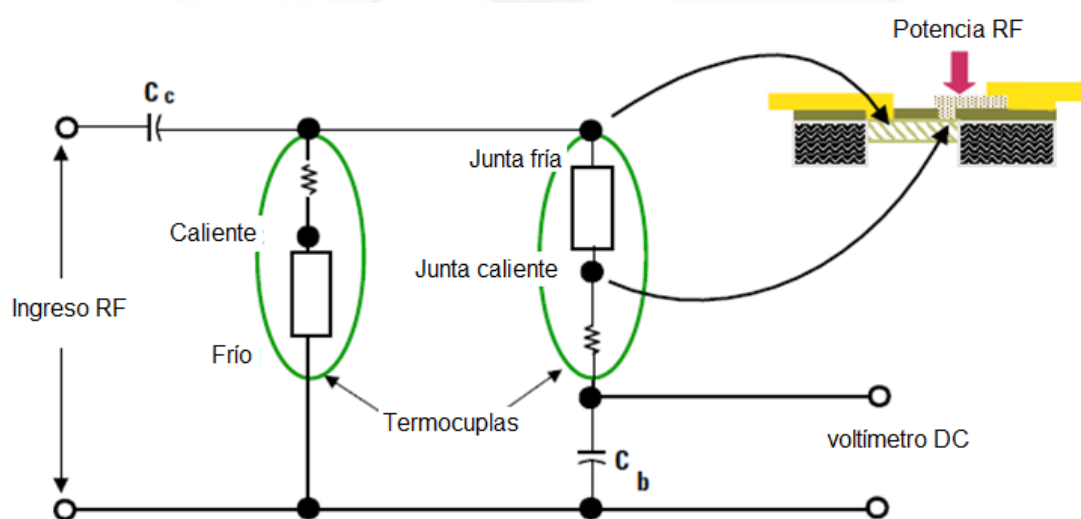


Figura 3.12: Medición de potencia RF con Termocupla [18]

El circuito contiene dos termocuplas idénticas en serie que forman una terminación de 50 ohmios para la línea de transmisión de RF. La medición por termocupla para RF es ideal para la medición de todo tipo de señales (continuas y moduladas).

La termocupla que se utiliza para sensar la potencia de RF está compuesta de bismuto y antimonio, con el fin de calentar un empalme cuando se detecta una energía de radio frecuencia, esta energía se disipa a través de un resistor construido de metales compensando el empalme. En general, la termocupla metálica tiende a tener reactancias parásitas y bajo nivel de desgaste, debido a esto, las termocuplas son conectadas por efectos reactivos en frecuencias de microondas por que la dimensión de los dispositivos llega a ser significativos con respecto a mayores longitudes de onda.

En la actualidad, las termocuplas se encuentran constituidas de mejor manera y se las puede conseguir como sensores de potencia comerciales. Un ejemplo es la termocupla marca HP,

modelo HP8481A que se muestra en la figura 3.13, la cual consta de una película muy delgada formada de nitrito de tantalio depositado en la superficie de un chip de silicio, que convierte la energía captada en energía calórica. Por otro lado, el material resistivo de nitrito de tantalio forma una terminación de baja reflexión para la línea de transmisión de radiofrecuencia de 18 GHz aproximadamente[38].

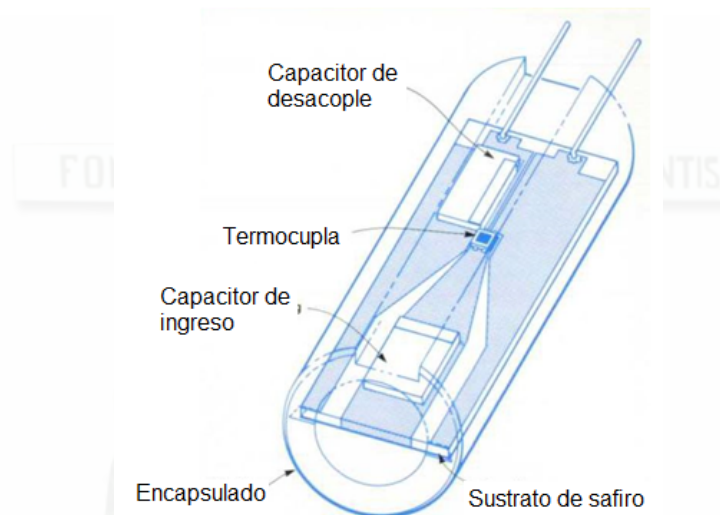


Figura 3.13: Composición de sensor HP8481A [15]

La característica principal de este tipo de sensores es la sensibilidad que viene dada por la relación de entrada en mW y como salida, presenta un resultado en μV . Este resultado es el producto de otros dos productos de la termocupla, estos productos son la potencia termoelectrónica y la resistencia térmica.

Para el sensor HP8481A la potencia termoelectrónica es de $250 \frac{\mu V}{^{\circ}C}$, la resistencia térmica tiene un valor de $0,4 \frac{^{\circ}C}{mW}$. De esta forma la sensibilidad completa de cada termocupla es de $100 \frac{\mu V}{mW}$. Finalmente, si dos termocuplas se colocan en serie alcanzarían a tener un valor de $160 \frac{\mu V}{mW}$ de sensibilidad.

3.3.3. Método de Detección por Diodo

Este método de detección por diodo fue tomado de [13].

Los sensores de potencia que funcionan mediante la detección por diodo rectifican la señal de RF, previamente filtrada, y entregan un valor de voltaje proporcional a la potencia de la señal de análisis. En la figura 3.14 se muestra el circuito para la detección de potencia de una señal RF mediante un diodo. El circuito utiliza un capacitor Cb que filtra la componente de frecuencia de la señal, dejando únicamente pasar la señal de corriente continua, y además, utiliza una resistencia de acople la cual es la terminación de 50 ohmios para la línea de transmisión.

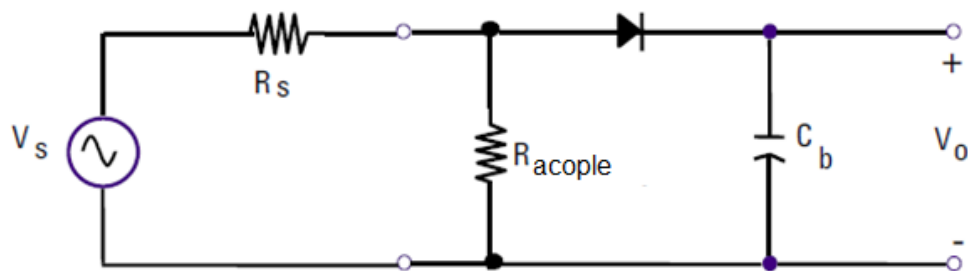


Figura 3.14: Circuito para medición de potencia por detector de diodo [13]

El voltaje a la salida del circuito, el cual es rectificado y filtrado por el diodo y el capacitor respectivamente, es proporcional al cuadrado del voltaje de ingreso, es decir, es proporcional a la potencia de la señal de RF analizada. La respuesta del circuito es lineal a la potencia de la señal en valores que se encuentran dentro de la región de la ley de cuadrados como se observa en la figura 3.15. Se conoce como región de ley de cuadrados pues según la ley de Ohm, el voltaje debe ser proporcional a la raíz cuadrada de la potencia.

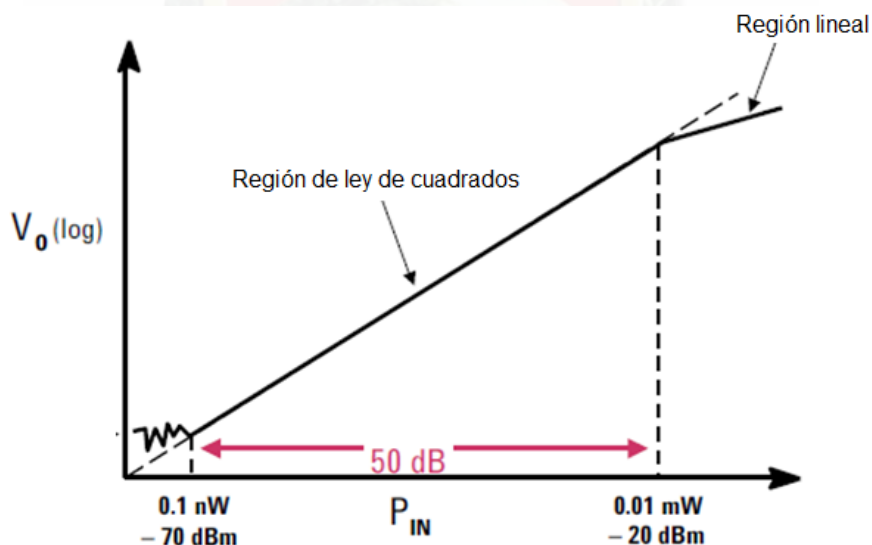


Figura 3.15: Curva de operación del diodo [13]

Como se puede observar, la respuesta típica de un diodo sensor de RF tiene una respuesta lineal que va desde los -70dBm a los -20dBm, es decir posee un rango dinámico de 50dB. Luego de la región de ley de cuadrados el resultado a la salida del sensor se vuelve exponencial y no puede ser utilizada para medir la potencia de la señal RF por métodos tradicionales. Para aumentar el rango dinámico de este tipo de sensores, se utilizan técnicas que requieren la utilización de circuitos integrados tipo CMOS para calibrar la salida del sensor y poder aprovechar la lectura

de zonas no lineales o exponenciales.

3.3.4. Detectores de Potencia en Circuitos Integrados

En la mayoría de los circuitos para aplicaciones inalámbricas, es necesario monitorear y controlar los niveles de potencia de RF transmitidos y recibidos. Esto se hace para minimizar el consumo de corriente del amplificador de potencia, controlar la ganancia del receptor, optimizar el rendimiento y la eficiencia.[14]

Para medir la potencia de RF, se utilizan tres enfoques diferentes: el detector de envolvente, el detector LOG y el detector RMS.

Cada uno de estos satisface las prioridades y necesidades de la aplicación de los diferentes tipos de formas de onda de RF complejas, así como los problemas de rendimiento y costo [22].

La medición de la potencia de RF se puede realizar de forma: inalámbrico o analámbrico. Para la tecnología inalámbrica, la potencia radiada real es detectada por un transductor, como un objetivo del diodo, que luego produce una señal proporcional a la potencia de RF que incide en él.

Cuando medimos la potencia de RF en un circuito simple, no estamos midiendo la potencia directamente, si no el voltaje y la corriente a través de una resistencia conocida. Una vez que se conozca el voltaje o la corriente se puede calcular la potencia. Si bien esta es una forma indirecta de evaluar la potencia de RF, es bastante precisa si se realiza correctamente, y es más conveniente y práctica.

Puede parecer que la forma de calcular la potencia sea digitalizar el voltaje o la corriente de RF detectados y luego realizar los cálculos apropiados, pero esto es muy poco práctico por varias razones. El proceso de digitalización requeriría un convertidor con una velocidad y resolución extraordinariamente altas, que generalmente no está disponible. Dicho convertidor también disiparía una potencia significativa, mientras que el cálculo de alta velocidad en tiempo real requeriría una capacidad de procesamiento considerable.

En la industria se conoce como detectores de radiofrecuencia a equipos o circuitos integrados que poseen en su interior un sensor de detección por diodo y el sistema de acoplamiento y linealización de la señal, utilizando técnicas de construcción de circuitos CMOS mediante las cuales pueden ampliar el rango dinámico de detección [14].

Existen varios fabricantes de detectores de potencia de RF entre los más importantes Analog Devices, Linear Technologies y Hewlett Packard, los cuales diseñan y construyen circuitos integrados capaces de medir la potencia de RF utilizando pocos elementos externos.

En esta tarjeta incorpora los siguientes dispositivos:

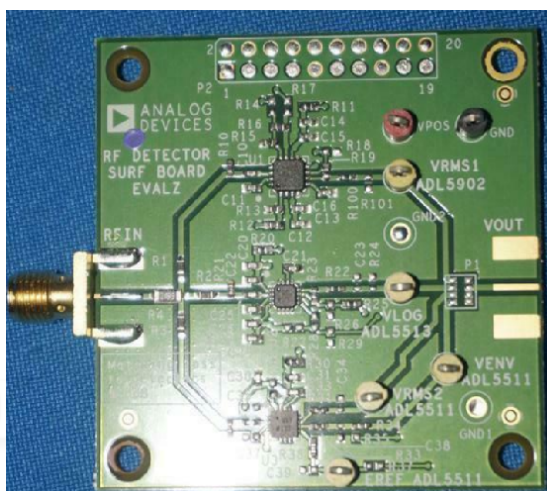


Figura 3.16: Tarjeta de evaluación para detección de radiofrecuencia

1. ADL5902, 50 MHz - 9 GHz, 65 dB TruPwr RMS Detector
2. ADL5513, 1 MHz - 4 GHz, 80 dB Logarithmic Detector
3. ADL5511, DC - 6 GHz, 47 dB Envelope and TruPwr RMS Detector

El circuito integrado posee características superiores a algunos sistemas de medición tradicionales, teniendo entre sus principales ventajas el costo.

En el presente trabajo, la captación de señales RF se realiza por medio de la tarjeta de evaluación de detección de RF de Analog Devices, esta tarjeta se compone por tres detectores de potencia. En la figura 3.16 se puede apreciar la tarjeta detectora.

En las características mencionadas anteriormente sobre los detectores de potencia se puede determinar algunas ventajas de los mismos al implementarlos en un proyecto, a continuación, se detallan las siguientes ventajas:

- Una de las ventajas más representativas, es su amplio rango de frecuencia que pueden abarcar. En el mercado se pueden encontrar detectores que funcionan en frecuencias desde 1 MHz hasta los 6 GHz.
- Su sensibilidad de potencia es de -55 dBm, en algunos casos este valor se puede ampliar con un amplificador de bajo ruido [LNA](#).
- Puede trabajar con señales de hasta +19 dBm en el nivel alto.
- Son tolerables a la variación de temperatura desde -40°C hasta los +125°C.
- Su miniaturización le hace ideal para portabilidad y eficiencia.
- Los detectores tienen la capacidad de complementarse con otros dispositivos [RF](#) para mejorar su funcionamiento, sin presentar complicaciones al implementarse.

3.3.4.1. Función de transferencia de un Detector RF

Se emplea un detector de RF que es un medidor de potencia de RF en miniatura para lo cual se inyecta entrada de potencia RF (dBm) y a la salida obtenemos voltios (V) ver figura 3.17.

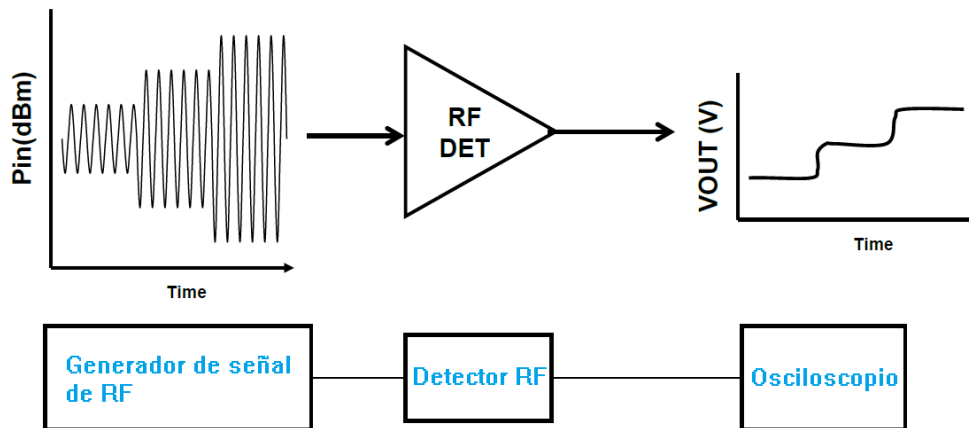


Figura 3.17: Función de transferencia General [19]

Los detectores de diodo se ven más afectados por la temperatura que los detectores de circuito integrado, ya que es necesario de un elemento lo más lineal posible para la obtención adecuada de la potencia que defina una pendiente constante de $\frac{mV}{dB}$ (figura 3.18).

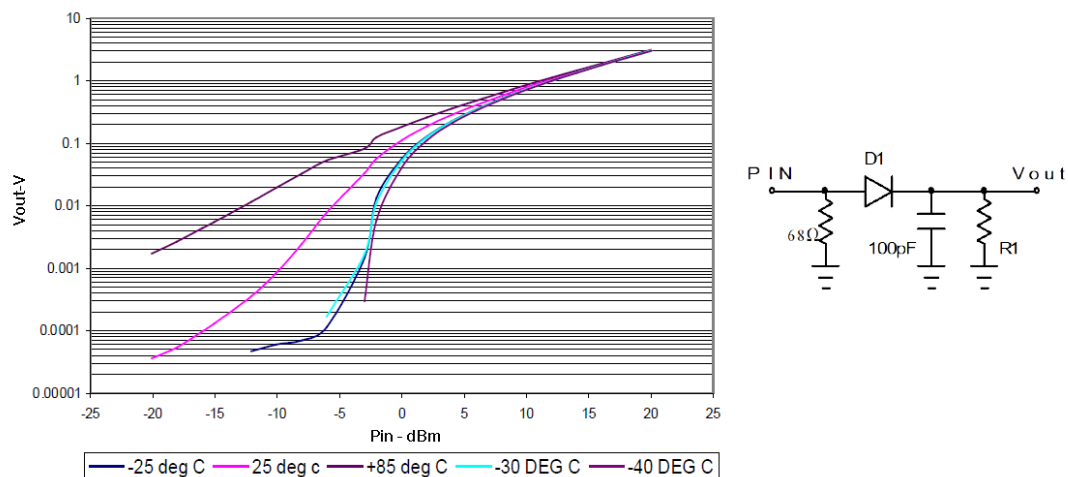


Figura 3.18: Función de transferencia de un Diodo [19]

3.3.4.2. Detectores RMS

La medición de potencia de una señal RF depende de la complejidad de la señal como tal, es así que para señales específicas se utiliza la medición de potencia pulsada y potencia pico de envolvente. En la figura 3.19 se puede observar el ejemplo de una comunicación W-CDMA y de una IS-95. Como se puede observar, los criterios expuestos para la medición de potencia en ondas continuas o moduladas con métodos de potencia media, pulsada o envolvente serían muy complejos de implementar debido a la variación de este tipo de señales en el tiempo.

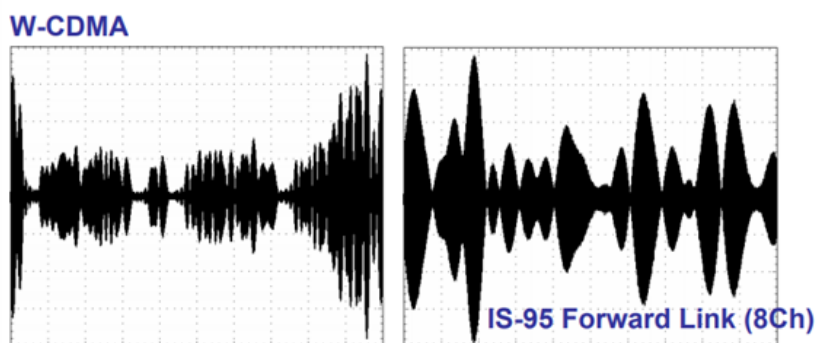


Figura 3.19: Ejemplo de señales CDMA e IS-95 [20]

Las señales de los sistemas actuales de telecomunicaciones son cada día más complejas lo cual implica que la medición de potencia debe permitir la identificación de variaciones en amplitudes, frecuencias, envolventes, etc.

Para realizar estas mediciones los fabricantes han desarrollado dispositivos electrónicos que mejoran la medición por detección de diodo, permitiendo el uso de la función RMS, es decir, permite la medición de potencia de todo tipo de señales ya sean cuadradas, rectangulares, sinusoidales y con variaciones. Este concepto es especial pues da una respuesta mucho más exacta de la medición de potencia en comparación con otros métodos, ya que los dispositivos tradicionales realizan los cálculos de potencia (en particular de ondas sinusoidales) suponiendo que la onda es perfecta, sin variaciones que modifiquen su forma, mientras que en la práctica, las señales tienden a variar su forma no sólo por su modulación sino por parámetros externos como ruido[39]. En la figura 3.20 se muestra la diferencia entre valores pico, RMS y promedio de una señal sinusoidal.

Los detectores RMS implementan un tipo de computo analógico en su interior mediante la combinación de un amplificador operacional y un multiplicador analógico.

En la figura 3.21 se muestra un diagrama de bloques de un detector RMS genérico, donde se observa el multiplicador al ingreso del circuito y el amplificador operacional. El circuito se encarga de obtener el valor RMS del voltaje de entrada y convertirlo en una señal de salida de voltaje equivalente. Se observan también las ecuaciones que tienen lugar en cada punto del

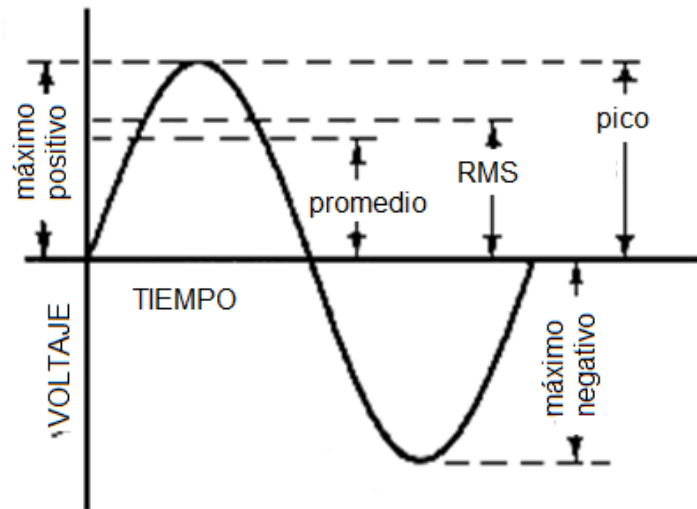


Figura 3.20: Parámetros de voltaje RMS, promedio y pico de una onda sinusoidal [21]

circuito.

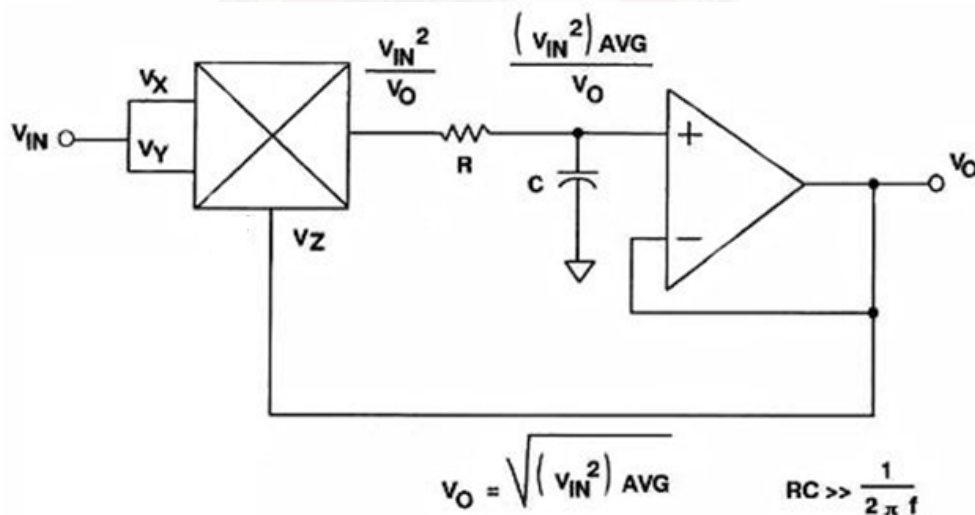


Figura 3.21: Diagrama funcional del detector ADL5902 [22]

Un ejemplo de un detector **RMS** comercial es el ADL5902 de Analog Devices, el cual es el que se utiliza en el presente trabajo y cuyo bloque funcional se muestra en la figura 3.22. Se observa que el circuito integrado cuenta con multiplicadores, un amplificador operacional y circuitos adicionales para la estabilidad de la señal.

El detector **RMS** ADL5902 que se utiliza en el presente tema de trabajo tiene la siguiente función de transferencia ver figura 3.23.

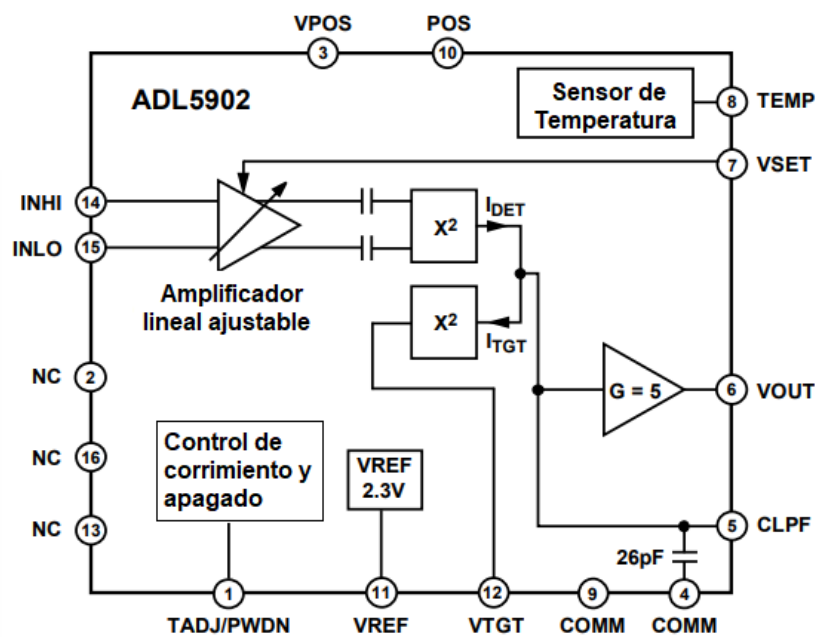


Figura 3.22: Diagrama de bloques de un detector RMS [23]

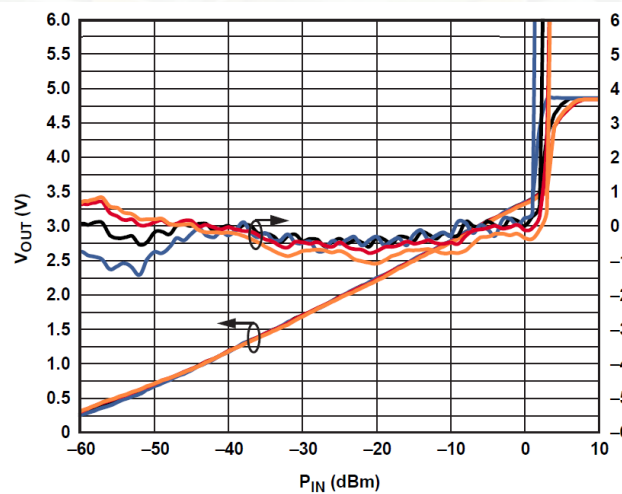


Figura 3.23: Función de transferencia del detector RMS ADL5902 [23]

En este tipo de detectores de potencia de respuesta eficaz generalmente al accionarlos con una fuente de impedancia de entrada de 50Ω se tiene un rango dinámico de 65 dB. El detector de potencia ADL5902 permite operar hasta una frecuencia máxima de 9 GHz, eliminando la necesidad o cualquier otra forma de ajuste externo de entrada.

Tiene la característica de manejar un valor de potencia en la entrada de -54 dBm a +7 dBm, encuentran aplicación en:

- Amplificador de potencia de linealización / control de bucle.
- Controles de potencia del transmisor
- Indicación de intensidad de señal (RSSI)
- Instrumentación RF

Las características del chip ADL5902 se presentan en la figura 3.24.

TruPwr™ RMS Detectors									
Part Number	RF Frequency (MHz)	Dynamic Range (dB)	Output Response	Response Time	Temp Stability (dB)	Supply Voltage (V)	Supply Current (mA)	Package	Comments
AD8363	>0 to 6000	50	Linear in dB	3 μ s	$\leq \pm 0.5$	4.5 to 5.5	60	4 mm \times 4 mm, 16-lead LFCSP	Single-ended drive, operation to 125°C, pin compatible with ADL5902
ADL5902	50 to 9000	65	Linear in dB	3 μ s	$\leq \pm 0.3$	4.5 to 5.5	73	4 mm \times 4 mm, 16-lead LFCSP	Single-ended drive, operation to 125°C, pin compatible with AD8363
AD8364	>0 to 2700	60	Linear in dB	45 ns	± 0.5	4.5 to 5.5	70	5 mm \times 5 mm, 32-lead LFCSP	Dual channel AD8362

Figura 3.24: Características del chip ADL5902, 50 MHz - 9 GHz, 65 dB TruPwr RMS Detector

3.3.4.3. Detectores Logarítmicos

El detector **LOG**, también utiliza un diodo. Se basa en la respuesta logarítmica inherente de un diodo, que desarrolla una salida de voltaje proporcional al logaritmo de la entrada ver figura 3.25; por lo tanto, es lineal en salida con una entrada de dB. Es especialmente útil cuando la potencia de la señal de RF crece. El detector **LOG** es un buen ajuste para señales pulsadas, como el radar, debido a su rápida respuesta y coincidencia con las prioridades de la aplicación.

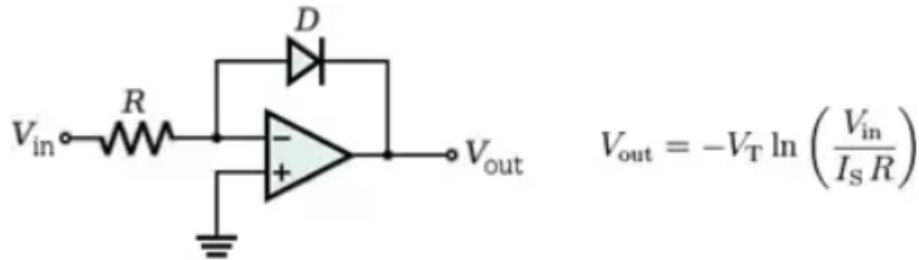


Figura 3.25: El detector LOG utiliza la función inherente de transferencia de corriente/tensión de un diodo, donde I_S y V_T son la corriente de saturación y la tensión térmica, respectivamente, del diodo [22]

Un ejemplo de un detector **LOG** comercial es el ADL5513 de Analog Devices, el cual es el que se utiliza en el presente trabajo y cuyo bloque funcional se muestra en la figura 3.26. Se observa que el circuito integrado cuenta con múltiples amplificadores operacionales y circuitos adicionales para la estabilidad de la señal.

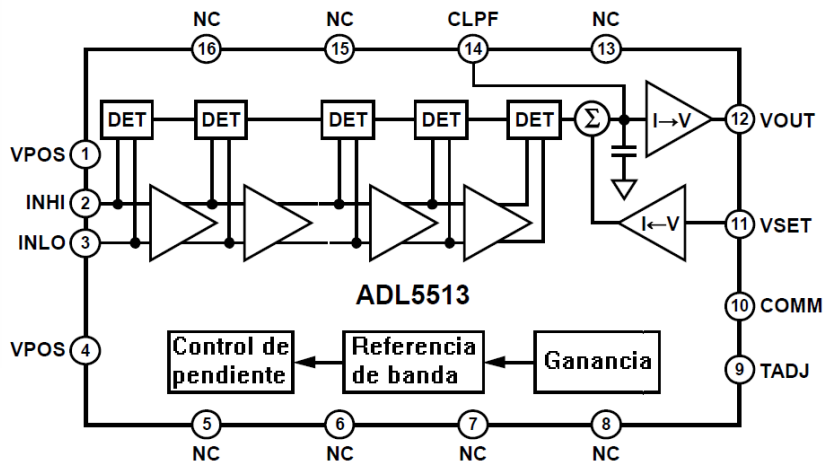


Figura 3.26: Diagrama de bloques de un detector LOG [23]

El detector **LOG** ADL5513 que se utiliza en el presente trabajo tiene la siguiente función de transferencia ver figura 3.27.

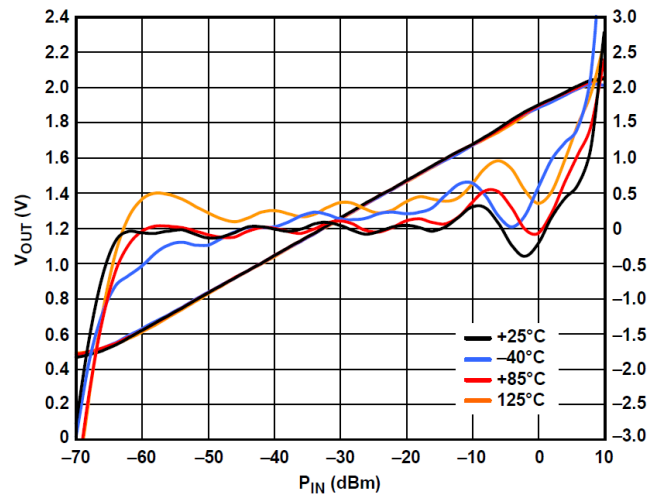


Figura 3.27: Función de transferencia del detector LOG ADL5513 [24]

El ADL5513 mantiene una conformidad de registro precisa para señales de hasta 4 GHz. El rango dinámico de entrada suele ser de 80 dB (referido a 50Ω) con un error inferior a ± 3 dB. El ADL5513 tiene la característica de manejar un valor de potencia en la entrada de -59 dBm a +19 dBm con un tiempo de respuesta de 20 ns que permite la detección de ráfagas de RF a una frecuencia de pulsos de más de 50 MHz. El dispositivo proporciona una estabilidad de intercepción logarítmica sin precedentes frente a las condiciones de temperatura ambiente.

Estabilidad por encima de - 40°C a +85°C rango de temperatura: ± 0.5 dB Rango de temperatura de funcionamiento: - 40°C a + 125°C.

Entre sus respectivas aplicaciones están:

- Monitorización de potencia en transmisores de enlace radio.
- Medición RSSI en estaciones base, WLAN, WiMAX, RADAR

Las características del chip ADL5902 se presentan en la figura 3.28.

Logarithmic								
Part Number	RF Frequency (MHz)	Dynamic Range (dB)	Temp Stability (dB)	Response Time (ns)	Supply Voltage (V)	Supply Current (mA)	Package	Comments
AD8317	1 to 10000	55	± 0.5	6	3.0 to 5.5	22	2 mm \times 3 mm, 8-lead LFCSP	Available in die
AD8318	1 to 8000	70	± 0.5	10	4.5 to 5.5	68	4 mm \times 4 mm, 16-lead LFCSP	High accuracy, fast responding
AD8319	1 to 10000	45	± 0.5	6	3.0 to 5.5	22	2 mm \times 3 mm, 8-lead LFCSP	Pin-compatible with AD8317
ADL5513	1 to 4000	80	± 0.5	20	2.7 to 5.5	31	3 mm \times 3 mm, 16-lead LFCSP_VQ	Next-generation AD8313, operation to 125°C

Figura 3.28: Características del chip ADL5513, 1 MHz - 4 GHz, 80 dB Logarithmic Detector

3.4. Sistema de Calibración

Es importante mencionar el sistema de calibración para obtener un valor proporcional del voltaje de salida respecto a la potencia de entrada[23],[24]. En el sistema de calibración implementado para estos detector de potencia requiere dos valores representativos. Estos son la pendiente y la intercepción. Estas dos características varían de un dispositivo a otro. La calibración del nivel de la placa debe realizarse para lograr una alta precisión [17]. La ecuación 3.7 para la tensión de salida idealizada se observa a continuación:

$$V_{OUT(IDEAL)} = (SLOPE)x(P_{IN} - INTERCEPT) \quad (3.7)$$

donde:

Slope, es el cambio en el voltaje de salida dividido para el cambio en la potencia de entrada en decibelios.

Intercept, es el nivel de potencia de entrada calculado en el que la tensión de salida es 0 V (se debe tener en cuenta que intercepta en un valor teórico extrapolado y no un valor medido).

En general, la calibración se realiza durante la fabricación del equipo aplicando dos o más niveles de señal conocidos a la entrada y midiendo los voltajes de salida correspondientes. Los puntos de calibración están generalmente dentro del rango de funcionamiento lineal en dB del dispositivo. Para obtener dos puntos de calibración, el Slope y el Intercept son calculados a través de la ecuación 3.8 y ecuación 3.9 de la siguiente manera:

$$SLOPE = \frac{V_{OUT1} - V_{OUT2}}{P_{IN1} - P_{IN2}} \quad (3.8)$$

$$INTERCEPT = P_{IN1} - \frac{V_{OUT1}}{SLOPE} \quad (3.9)$$

En base a los valores de Slope e Intercept se obtiene el valor de la potencia de entrada en función del voltaje de salida del detector mediante la ecuación 3.10.

$$P_{IN(unknown)} = \frac{V_{OUT1(medido)}}{SLOPE} + INTERCEPT \quad (3.10)$$

Es importante mencionar que los valores de SLOPE e INTERCEPT juegan un papel importante en el proceso de obtención del valor de la potencia de entrada.

En la práctica con ayuda del osciloscopio se estableció que la tarjeta de evaluación tiene un rango de trabajo amplio de -54 dBm hasta +7 dBm en el caso del **RMS** y -59 dBm hasta +19 dBm en el caso del **LOG**, como punto máximo para la captación de señales. Se tomaron muestras a las salidas de los detectores que nos permiten obtener un valor en mili-Volts y con ello realizar un barrido de la potencia de transmisión mientras se mantenía la frecuencia constante de 1090 MHz. En la práctica se logró comprobar que al inyectarle directamente una

señal RF configurado a una frecuencia diferente, la respuesta del dispositivo era similar hasta los 4 GHz.

La calibración del dispositivo se realizó utilizando el equipo generador de señal de **Rohde Schwarz SMB100A RF**, este equipo permite generar hasta 1100 MHz a una potencia máxima de +19dBm, cosa que otro equipo de RF del laboratorio de telecomunicaciones no alcanzaba esta potencia, para otras frecuencias. Se observa que la tarjeta presenta una respuesta lineal, en la figura 3.29 y figura 3.30 se obtiene el comportamiento de la tarjeta para el detector **RMS** y **LOG** respectivamente.

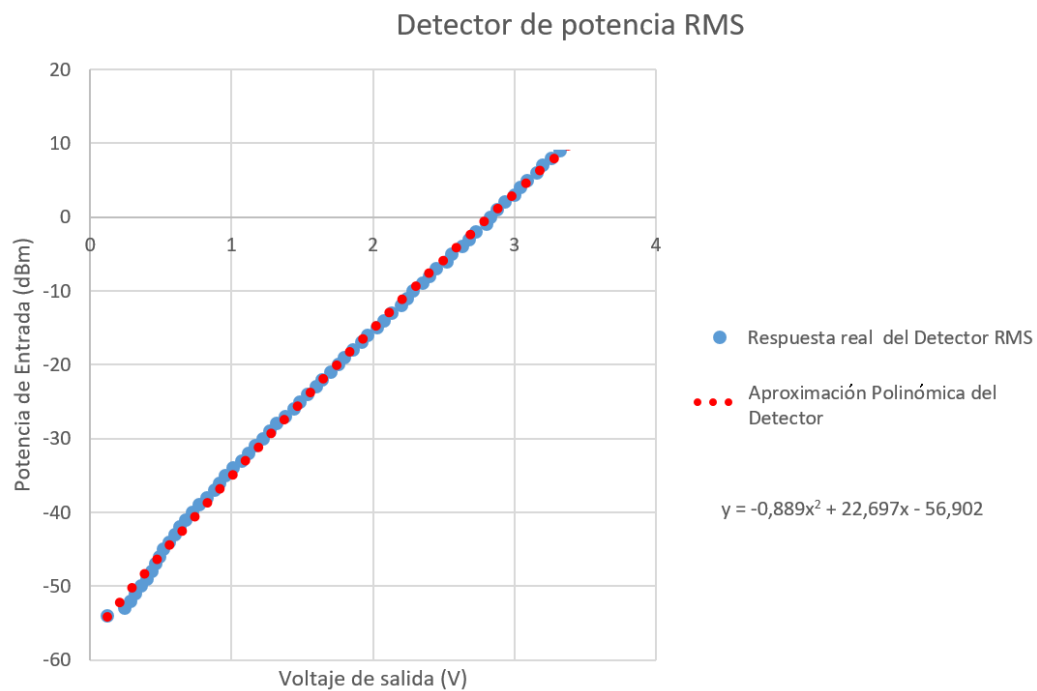


Figura 3.29: Comportamiento del detector RMS

Como se observa en la figura 3.30, la tarjeta presenta datos inciertos desde la potencia de -59dBm. Esto indica que para estas potencias los detectores se saturan y no permiten capturar la señal adecuada, de las gráficas planteadas en las figuras 3.29 y 3.30 se obtuvieron las respectivas ecuaciones las cuales son utilizadas en el programa para eliminar el proceso de calibración y obtener una mejor aproximación para las frecuencias hasta 3GHz, sin necesidad de cambiar el SLOPE e INTERCEPT.

Para el caso del detector **RMS** se utiliza la Ecuación cuadrática debido a su mejor desempeño que la lineal ecuación 3.11.

$$Y = -0,889X^2 + 22,697X - 56,902 \quad (3.11)$$

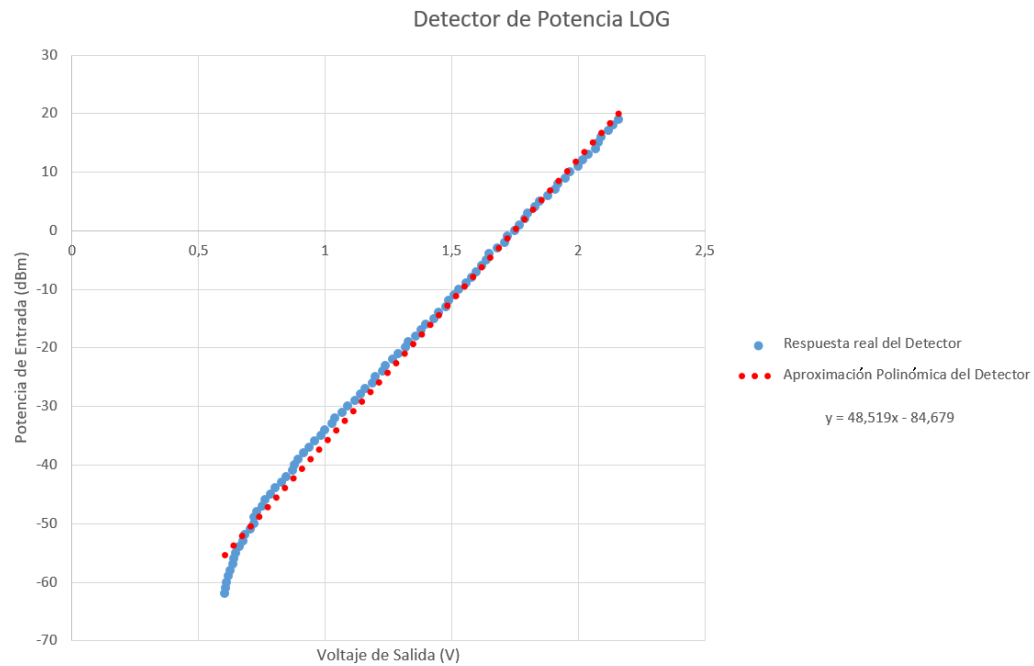


Figura 3.30: Comportamiento del detector LOG

Para el caso del detector LOG se utiliza la Ecuación lineal 3.12.

$$Y = 48,519X - 84,679 \quad (3.12)$$

Por último el voltaje de alimentación es de $5 V_{DC}$; para que, funcione de manera eficiente. Esto provoca que entregue un valor máximo a la salida correspondiente a $3.5 V_{DC}$.

3.5. Filtro de Radiofrecuencia

Los filtros en el mundo real no tienen las características ideales ver figura 3.31. Las transiciones verticales en los bordes de las bandas de paso del filtro, prácticamente no se pueden construir. La selectividad de un filtro es un parámetro crítico de diseño generando zonas de transición que ocupan un determinado ancho en frecuencia.

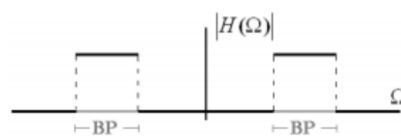


Figura 3.31: Filtro pasa banda ideal [25]

Los filtros microstrip son muy atractivos para aplicaciones de RF ya que poseen ventaja sobre otros filtros. El filtro microstrip es pequeño, económico y ofrece un rendimiento mejorado.

En la práctica se flexibilizan las exigencias sobre el filtro como son:

- No se exige respuesta de magnitud en la banda de paso
- Se inserta una banda de transición
- No se exige atenuación absoluta en la banda de rechazo

Las condiciones anteriores se expresan en la figura 3.32.

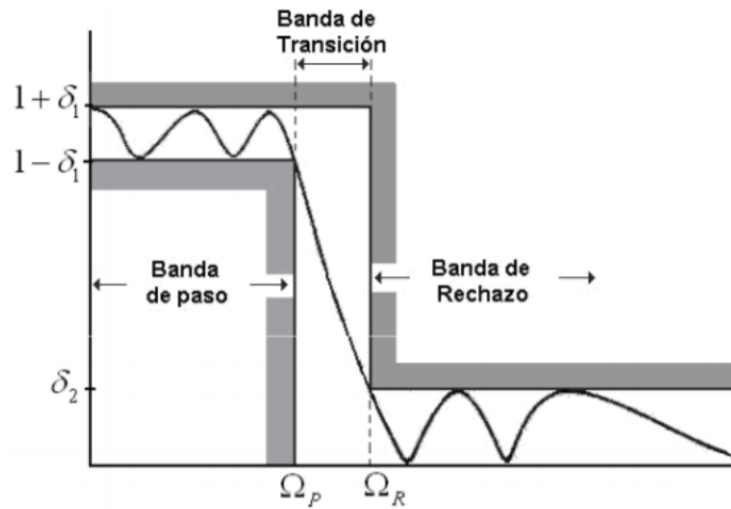


Figura 3.32: Banda de Transición del filtro pasa banda [25]

3.6. Amplificadores de bajo ruido LNA

El factor de ruido (f) se define como el cociente entre la S/N (relación señal/ruido) a la entrada de un dispositivo y la S/N a la salida del mismo. Da una indicación de cuánto se degrada la señal al pasar por él definido por la ecuación 3.13 [30].

$$f = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} \quad (3.13)$$

La figura de ruido (NF) es simplemente el factor de ruido en unidades logarítmicas definido por la ecuación 3.14 :

$$NF = 10 \log(f) [dB] \quad (3.14)$$

El amplificador de bajo ruido es un amplificador electrónico de pequeña señal utilizado para amplificar señales débiles. Por lo general se encuentra cerca del dispositivo detector para reducir las pérdidas en la línea de alimentación [30].

Un buen LNA tiene una **NF** baja, una ganancia lo suficientemente grande y un adecuado ancho de banda de funcionamiento.

El diseño de la maqueta didáctica se realizó utilizando [26], tiene las ventajas de un amplio rango de frecuencia, alta ganancia, bajo figura de ruido. Se puede utilizar para varias frecuencias de recepción de radio para aumentar la distancia de comunicación. El amplificador está provisto de una cubierta de protección y de un diodo de protección inverso.

Indicadores técnicos:

- Voltaje: 5V DC consumo de 85mA
- Ganancia: 20 dB impedancia: 50 Ohm
- Ancho de banda: 50MHz-4GHz
- Coeficiente de figura de ruido: 1.3 dB
- Escudo con cerramiento de metal

La figura 3.33 indica el nivel de ganancia del LNA, al aumentar la frecuencia disminuye la ganancia del amplificador.

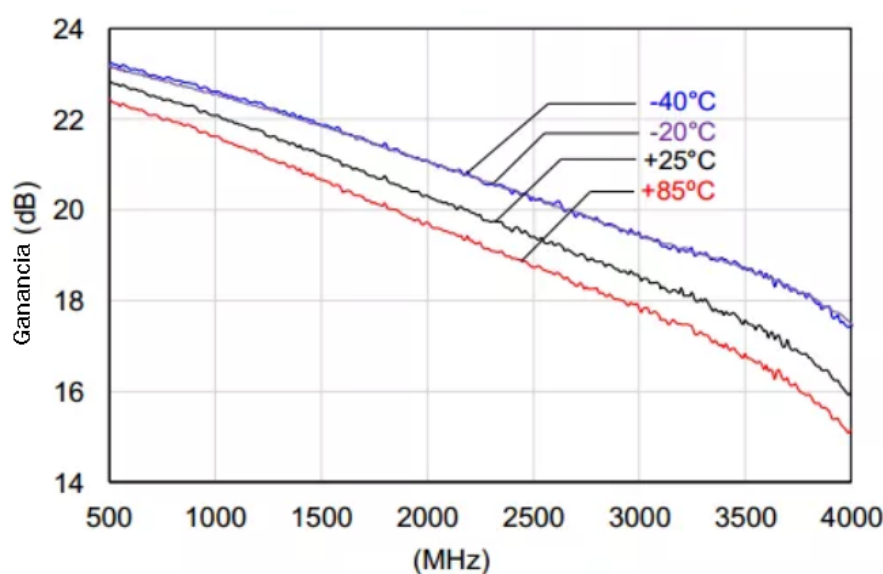


Figura 3.33: Ganancia en todo el ancho de banda del LNA a diferentes temperaturas [26]

Existe en el mercado varios **LNA**, su elección depende del uso, de la ganancia, el ancho de banda de funcionamiento, entre otros [40].



Capítulo 4

Diseño y construcción de la Maqueta

Se detallan los procedimientos del diseño y la construcción de la maqueta. Se detalla además la metodología de medición de un patrón de radiación de una antena.

4.1. Componentes Principales para medir el Patrón de Radiación de una Antena en modo Recepción

Se logran identificar cinco sistemas principales para obtener el patrón de radiación de una antena. Cada uno de estos sistemas permiten conocer la manera en que la antena en análisis responde ante una señal de RF para obtener su patrón de radiación. En la figura 4.1, se muestra la disposición del sistema mencionado:

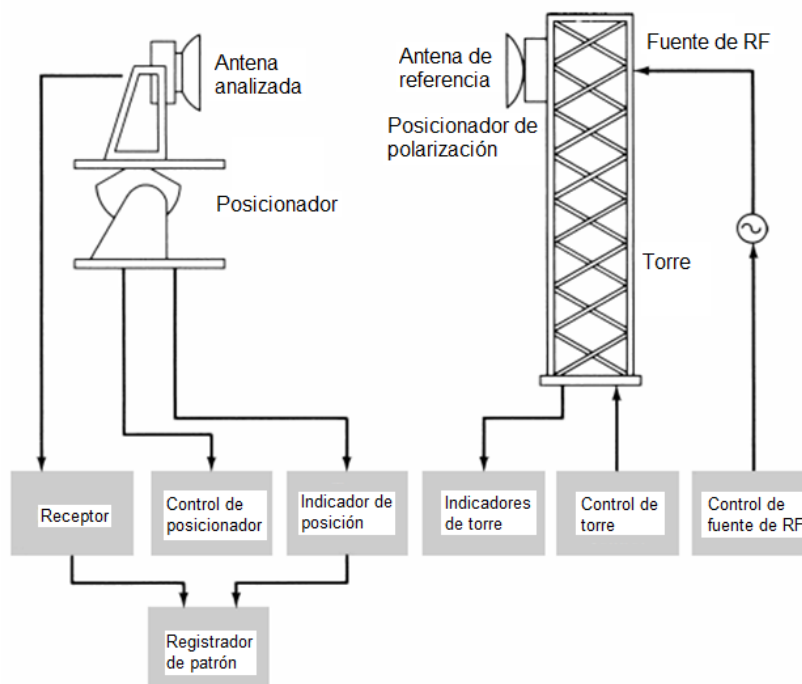


Figura 4.1: Sistema mínimo para obtener patrones de radiación [5]

1. Antena y Sistema de Transmisión

El sistema de transmisión utilizado para la caracterización de antenas es el encargado de generar la señal de radiofrecuencia de referencia. La señal luego de atravesar el medio de transmisión (aire) es recibida por la antena bajo análisis. El sistema de transmisión consta de los siguientes elementos:

- Generador de RF
- Medio de transmisión alámbrico (cable)
- Antena Transmisora

2. Sistema de Recepción de RF

El sistema de recepción de RF es el encargado de recibir la señal de referencia mediante la antena de la cual se requiere conocer el patrón de radiación. Está conformado por los siguientes elementos:

- Antena Receptora
- Filtro de RF
- Amplificador LNA
- Detector de Potencia

La antena receptora es el elemento en análisis. Se requiere conocer parámetros como directividad, eficiencia, impedancia, polarización, patrón de radiación, etc. La señal captada por la antena receptora necesita ser filtrada en la frecuencia de prueba. La función básica del filtro de RF es permitir el paso de ciertas frecuencias dentro de un cierto rango y rechazar (atenuar) las frecuencias fuera de ese rango. Posteriormente la señal filtrada se amplifica mediante un LNA. Finalmente el detector de potencia es el equipo o circuito encargado de adaptar la señal del sensor para que pueda ser interpretada por los sistemas de almacenamiento y procesamiento de datos.

3. Sistema de Posicionamiento de la Antena en Análisis

Es el sistema encargado de modificar de manera automática, el azimut de la antena receptora. Normalmente consta de una base que permite el giro de la antena montada en su parte superior. El objetivo de la variación del posicionamiento de la antena es variar el ángulo con el cual la señal de referencia incide en la misma.

4. Sistema de Almacenamiento de Parámetros

El sistema de almacenamiento de parámetros o de datos permite guardar de manera digital el resultado de la medición de potencia medida por el sistema de recepción de RF.

5. Sistema de Procesamiento de Parámetros y Datos

Este sistema es el encargado de procesar los parámetros y datos del resultado de la medición tanto de la generación de la señal de referencia como de la señal medida en la antena receptora. En sistemas actuales incluye también en su interior la memoria requerida para realizar las actividades del sistema de almacenamiento.

4.2. Solución Propuesta para el Sistema

La solución que se propone para obtener el patrón de radiación de una antena se muestra en la figura 4.2.

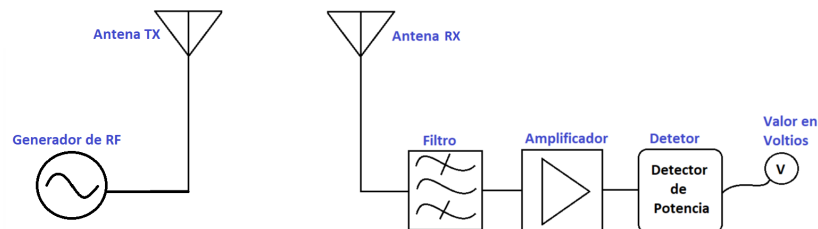


Figura 4.2: Solución Propuesta para obtener el patrón de Radiación de una Antena

Este modelo se compone de los siguientes elementos:

- **Generador de RF:** Genera señales de onda continua con una amplitud fija.
- **Antena Transmisora:** La antena que irradia la energía recibida del generador.
- **Antena Receptora:** La antena de la que se quiere obtener el patrón de radiación.
- **Filtro:** Debido a que no se cuenta con una cámara anecoica, se utiliza un filtro de RF pasa banda en la frecuencia de prueba para mejorar la definición del patrón de radiación obtenido.
- **Amplificador:** Se amplifica la señal recibida por la antena mediante un LNA.
- **Detector de Potencia:** Mediante un detector de potencia se convierte la señal radioeléctrica en un valor de voltaje de salida proporcional a la potencia de entrada.

4.3. Etapas Principales del Sistema Final

En base a la solución propuesta, se diseña un sistema de medición del patrón de radiación de antenas automático. Se identifica las etapas principales del sistema cuyo diagrama de bloques se muestra en la figura 4.3.



Figura 4.3: Diagrama de bloques del sistema didáctico para obtención de patrones de radiación

El sistema consta de cinco bloques. Cada bloque debe ser calibrado y estructurado para reducir los factores que influyen en la captura de datos y resultados finales.

Se debe considerar que este proyecto está conformado por un programa *Open Source* (Python) para el control total del sistema. El desarrollo del programa tiene como objetivo efectuar prácticas sin depender de algún tipo de generador RF específico, poder hacerlo portable y poder utilizarlo fuera del laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca.

Otro punto importante al hacer las prácticas es el describir el ambiente a profundidad para determinar todas las variables que podrían incidir en la toma de datos. Parte fundamental de la metodología es la descripción del procedimiento de medición, en el que se explica cómo se miden las variables.

4.4. Componentes del Sistema Final

De acuerdo a las etapas del sistema (figura 4.3) se planteó un esquema específico para este trabajo. En la figura 4.4 se muestran todos los componentes del sistema propuesto. Comenzando desde la parte izquierda de la figura 4.4, se observa el generador de funciones, que está conectado a la antena de transmisión que se encuentra en la torre transmisora. Por el otro lado, se tiene la torre de la antena receptora que consta de: componentes en la parte superior, parte inferior y la antena de prueba.

La parte superior e inferior se comunican mediante comunicación [Bluetooth](#). La parte superior es la encargada de recibir la señal de la antena, filtrarla a la frecuencia de prueba, amplificarla y mediante un detector de potencia de señales radioeléctricas enviar los valores de potencia a la parte inferior. La parte inferior se encarga de hacer rotar el eje principal de la torre de recepción, recibir los valores de potencia de la parte superior y enviarlos a la PC mediante comunicación serial. Finalmente los datos son graficados y mostrados en una interfaz gráfica. El control de todo el proceso de la captura del patrón de radiación se lo realiza desde la interfaz.

Los componentes de la parte superior e inferior de la torre de recepción se muestran en la figura 4.5. Los componentes de la parte superior son: un conector para la antena de prueba, un filtro de RF, un amplificador de bajo ruido (LNA), un detector de potencia radioeléctrica [LOG](#) y [RMS](#) y una placa principal. Ésta a su vez está compuesta de un módulo [Bluetooth](#) y un Arduino Nano. Los componentes de la parte inferior son: un motor [PAP](#), engranes que giran el eje principal, un detector de línea que sirve para posicionar el motor en un punto cero, y una placa principal compuesta de un Arduino Nano y un módulo [Bluetooth](#) que maneja el motor y las señales recibidas.

A continuación se detallan algunos equipos utilizados, placas electrónicas diseñadas y componentes adicionales que fueron utilizados en el diseño y construcción del sistema didáctico automático.

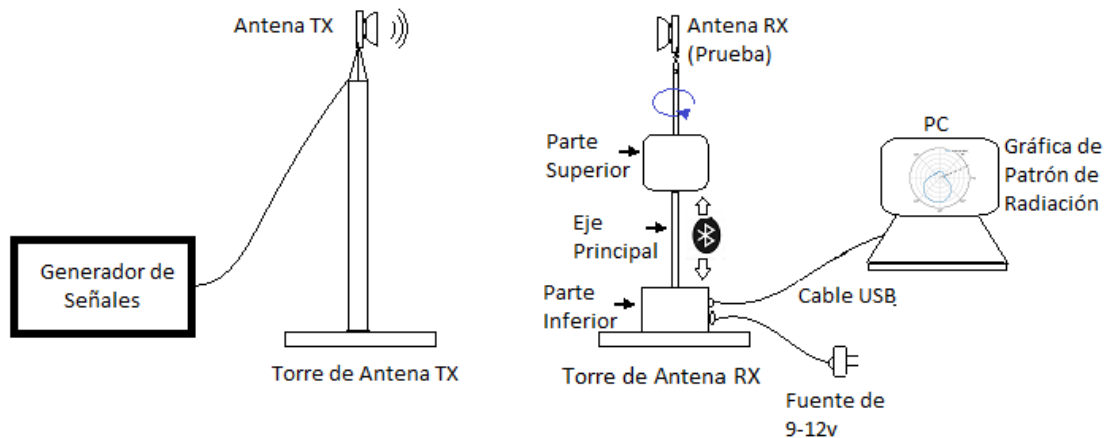


Figura 4.4: Componentes del Sistema

4.4.1. Generador de Señales

El generador de señales debe generar una onda senoidal continua, la cual puede ser modificada en frecuencia o amplitud. Los generadores de funciones deben desplegar en una pantalla la frecuencia de salida con gran exactitud. Las especificaciones principales de un generador incluyen la frecuencia máxima de la onda senoidal y el voltaje máximo de salida pico a pico con una determinada impedancia de entrada [41].

4.4.2. Placas Electrónicas

Se diseñaron tres placas electrónicas de circuito impreso que se acoplan a la maqueta para la transmisión de datos e implementación del control inalámbrico. De las tres placas (ver figura 4.6) en la parte superior de la imagen se tiene una fuente de alimentación compuesta por un interruptor de encendido y apagado y de un regulador de voltaje que reduce el voltaje de la batería (ver figura 4.7) de 9.5 V a 5.0 V. Con esta tensión de alimentación se energiza los detectores **RMS** y **LOG**, el amplificador de pequeña señal, el Arduino y el módulo **Bluetooth**.

La segunda placa diseñada consiste en un Arduino Nano y un módulo **Bluetooth**. La función de esta placa es digitalizar la señal de voltaje del detector de potencia y transmitirla mediante **Bluetooth**.

Por último, la tercera placa está conformada por un Arduino Nano, un módulo **Bluetooth** y un driver A4988. Estos elementos son responsables del control de giro de la torre de recepción mediante un motor **PAP**, de la recepción de los datos mediante el módulo **Bluetooth** y de la transmisión de datos a la PC.

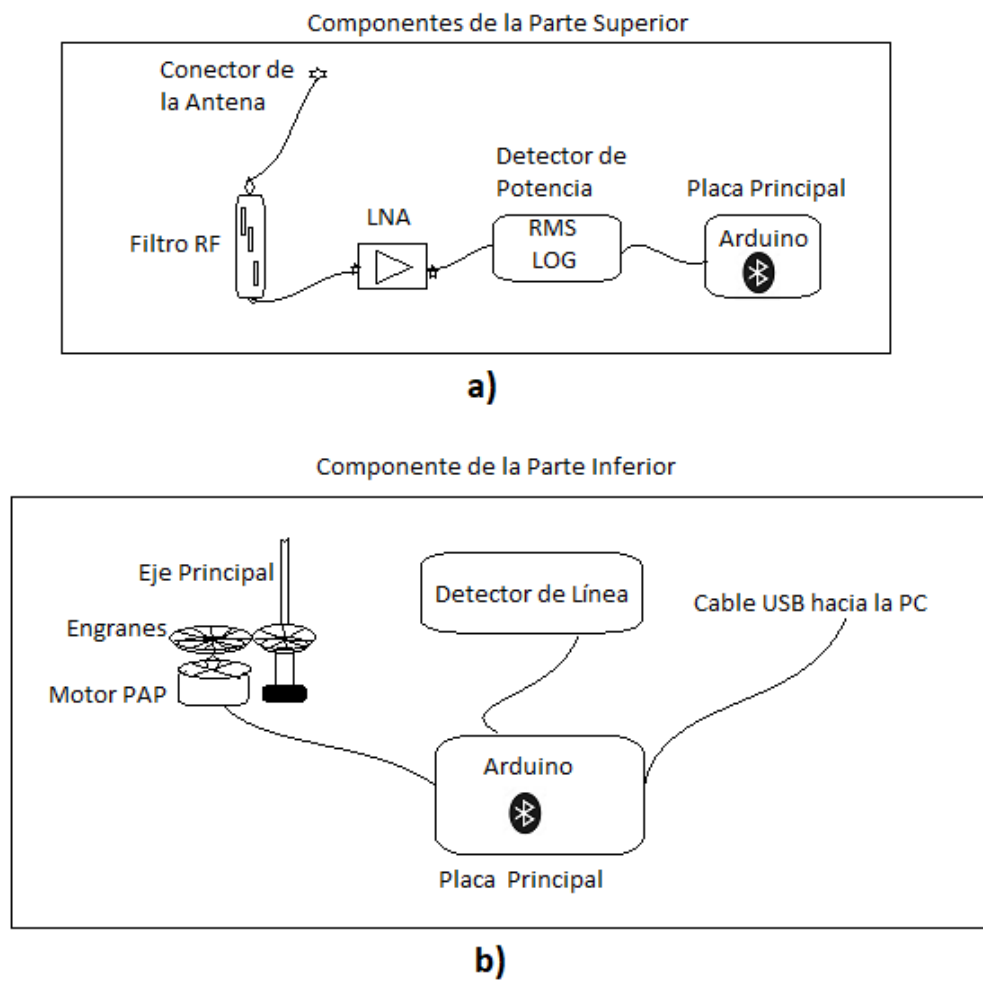


Figura 4.5: Componentes a) Parte Superior b) Parte Inferior

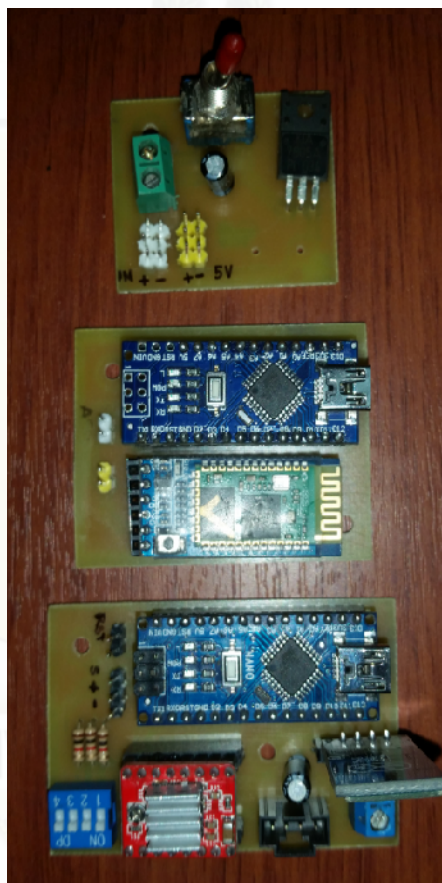


Figura 4.6: Principales placas para control y transmisión de datos

4.4.3. Baterías

Las baterías alimentan a todos los componentes de la parte superior de la torre de recepción. Estas baterías son recargables. Una imagen de las baterías y su cargador se pueden ver en la figura 4.7.



Figura 4.7: Baterías de alimentación

4.4.4. Soportes

Se diseñó en una impresora 3D ROBO unos soportes para la maqueta final (ver figura 4.8) la misma que ayuda a sostener las antenas, placas, detectores, filtros entre otros elementos necesarios.

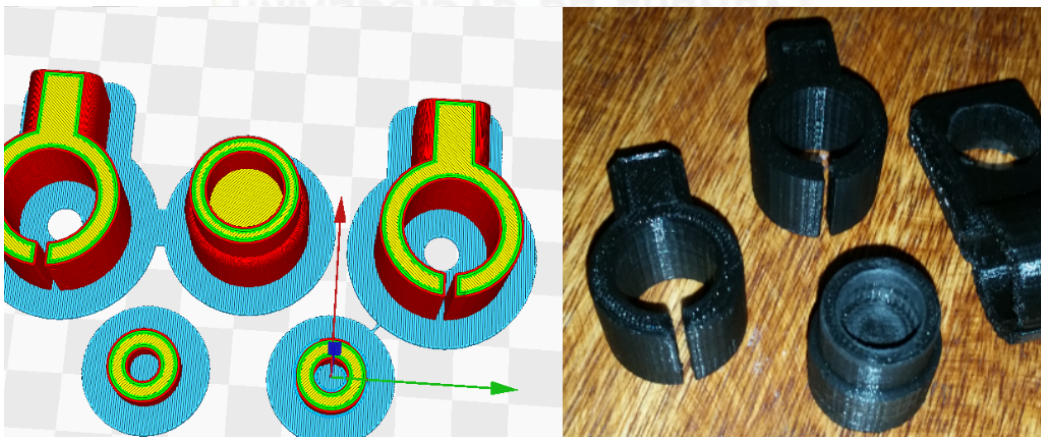


Figura 4.8: Soportes para las antenas

4.4.4.1. Sistema de posicionamiento de la antena receptora

El sistema de posicionamiento de antenas es implementado a través de un sistema de control. Este está compuesto por un motor de pasos bipolar EM-402 y un sensor infrarrojo, el cual se muestra en las figuras 4.9 y 4.10 respectivamente. Este motor se caracteriza por moverse 1.8° por cada paso, tener un torque de 2 Kg/cm y funcionar con una corriente de 500 mA. El sensor infrarrojo es un dispositivo que emite una luz infrarroja detectando la cantidad de luz reflejada, utiliza un voltaje de 5V. El sensor infrarrojo es utilizado para ubicar el sistema en su posición inicial.



Figura 4.9: Motor de pasos bipolar EM-402



Figura 4.10: Sensor infrarrojo TCRT5000

El control del motor de pasos se lo realiza mediante un módulo A4988 ver figura 4.11. Este controlador tiene la capacidad de generar micro pasos a través de la configuración de los pines, además tiene la capacidad de controlar la corriente que ingresa en el motor a través de un pequeño potenciómetro ubicado en la tarjeta.

Los pulsos que se utilizan para habilitar el motor, definir el sentido de giro, y el tren de pulsos, son realizados por el Arduino Nano.

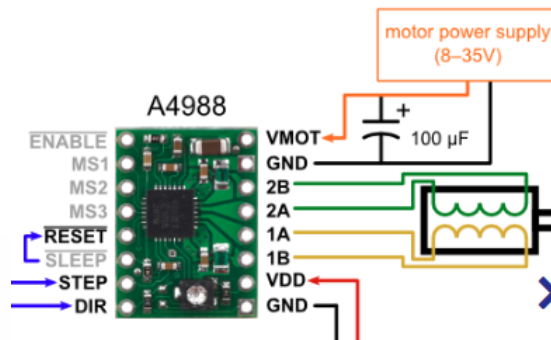


Figura 4.11: A4988 Stepper Motors Driver Module [27]

4.5. Prototipo Final del Sistema

Tomando como referencia la figura 4.4 se diseñó y construyó la parte física del sistema. El prototipo final y todos los componentes se presentan en la figura 4.12. Para la utilización del equipo es necesario contar con un generador de señales de RF, un filtro pasa banda centrado en la frecuencia de prueba, una antena de prueba, cables y conectores.

4.5.1. Torre de Soporte de Antena Transmisora

La figura 4.13 muestra la torre de soporte para la antena transmisora que está compuesta por siete elementos. Los elementos 1, 2 y 3 corresponden a conectores SMA. El elemento 4 es un soporte que mantiene los conectores sujetos al eje (5). El elemento 6 es el eje principal de la torre. El elemento 7 es la base de la torre.

4.5.2. Torre de Soporte de Antena de Prueba Receptora

La torre de soporte de la antena de prueba (figura 4.14) consta de 3 partes principales.

1. **Parte A:** La parte A consta de 3 conectores (Macho Tipo N-SMA, hembra Tipo N-SMA y UHF hembra-hembra) igual que la torre de transmisión. Estos conectores están sujetos mediante un soporte. Hay un segundo soporte que une el eje principal de la torre con todos los conectores.
2. **Parte B:** La parte B está cubierta por el protector de interferencia. Si se retira este protector se podrá observar un soporte de forma circular que contiene componentes en su parte superior e inferior. Los componentes de la parte superior se muestran en la figura 4.16.

Los componentes que se encuentran en la parte inferior se presentan en la figura 4.17.



Figura 4.12: Prototipo Final del Sistema



Figura 4.13: Torre de soporte para la antena transmisora



Figura 4.14: Torre de Soporte de Antena Receptora



Figura 4.15: Parte A de la torre

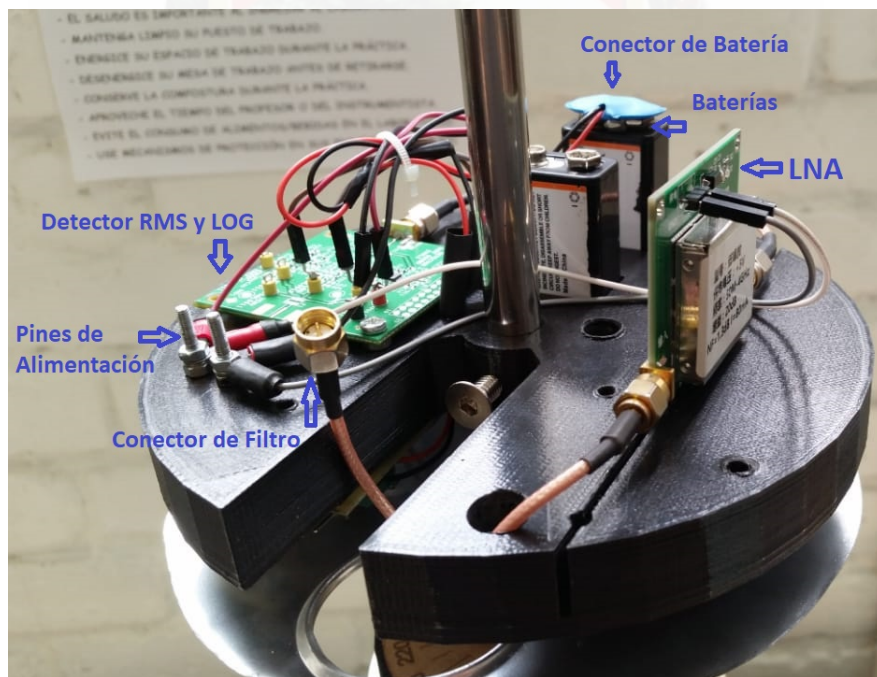


Figura 4.16: Componentes de la parte Superior

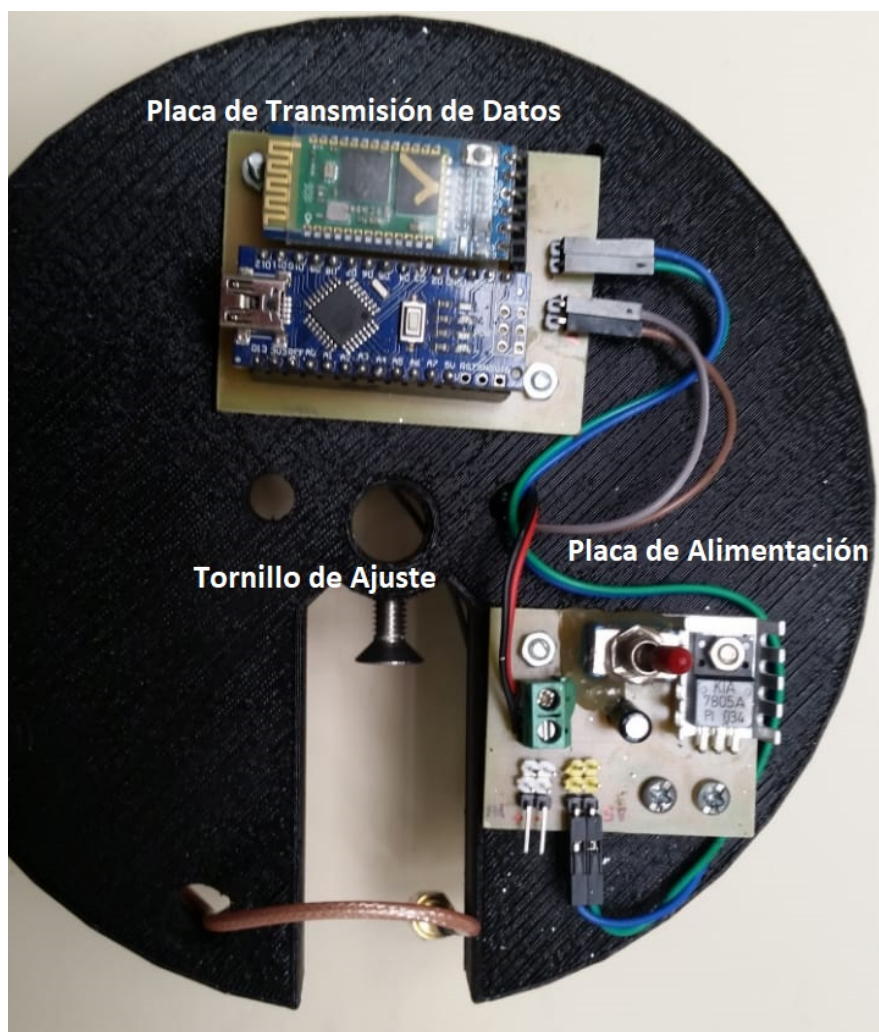


Figura 4.17: Componentes de la parte Inferior

3. Parte C

La parte C tiene componentes internos. Algunos conectores y un pulsante se encuentran en la parte externa. La parte externa se presenta en la figura D.16.

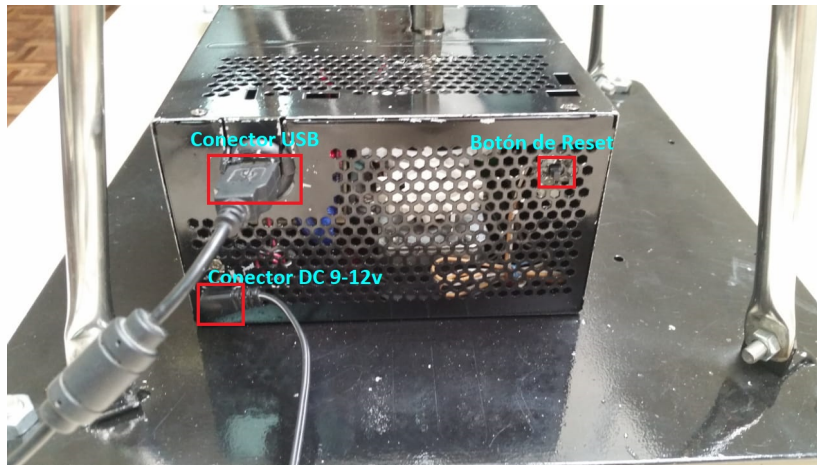


Figura 4.18: Parte C (Externa)

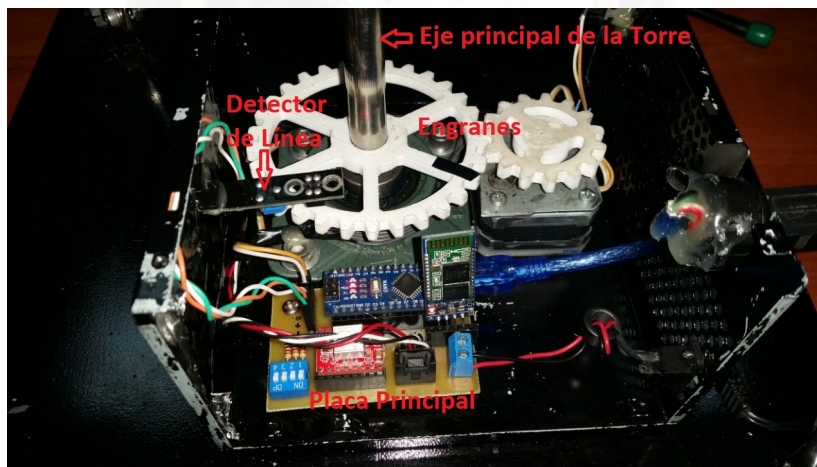


Figura 4.19: Parte C (Interna)

La parte interna (figura 4.19) cuenta con un motor de paso a paso que permite rotar el eje principal de la torre mediante engranes que se encuentran ubicados en el motor y en el eje principal. También cuenta con una placa principal que permite tanto la comunicación con la PC mediante comunicación serial como la comunicación con la parte B mediante un módulo Bluetooth.



Otro elemento de la parte C es un detector de línea negra. que sirve para colocar el motor en la posición inicial.

4.5.3. Cubierta Protectora, Fuente de 12V y Cable USB

La cubierta protectora sirve para evitar la interferencia del ambiente exterior. Ésta actúa como una jaula de Faraday. La cubierta va colocada en la parte B de la torre de recepción. La fuente de alimentación del motor [PAP](#) es de 9 voltios, aunque admite una tensión de hasta 12V. El cable USB permite la transferencia de datos de la torre de recepción a la PC.

4.6. Control y Procesamiento de señales

El control y procesamiento de datos se lo realiza a través de los programas desarrollados en Python y Arduino. Los programas tienen como objetivo controlar el giro del eje de la torre de recepción [PAP](#) y la transferencia de datos mediante la digitalización de los valores analógicos entregados por la tarjeta detectora de potencia. Se envía al programa los datos para poder procesarlos y presentar como resultado final el patrón de radiación de la antena.

4.6.1. Interfaz gráfica de Usuario

Se desarrolló una interfaz hombre-maquina [HMI](#) en Python , con el afán de brindar una interfaz amigable con el usuario y poder realizar capturas de señales en diferentes posiciones de la antena receptora y presentar un patrón de radiación de la antena en estudio. El programa es desarrollado bajo cinco funciones que son:

- Conexión
- Motor
- Captura de Datos
- Procesos
- Gráficos

La explicación a detalle de cada función se encuentra en el **Apéndice D**

4.6.2. Procesamiento de Datos

El procesamiento se realiza con los datos que se reciben de la torre de recepción para posteriormente utilizar las ecuaciones [3.11](#) y [3.12](#); para graficarlos y mostrarlos en la interfaz gráfica.

La interfaz completa se la presenta en la figura [4.20](#). La interfaz gráfica del programa, se compone de las funciones anteriores descritas y conforman: el control del motor, ajuste de escala, filtrado



Figura 4.20: Interfaz completa desarrollada en Python

y visualización de la potencia capturada por la antena receptora. Este control permite realizar capturas de forma automática y los resultados obtenidos se visualizan en tiempo real en las dos gráficas de potencia.



Capítulo 5

Metodología de Medición

Se obtiene la distancia mínima de separación entre antenas de referencia y la de prueba, mediante la determinación de la región de Fraunhofer o campo lejano. Finalmente se detallan los pasos necesarios para poner en marcha el equipo.

5.1. Determinación de la Región de Fraunhofer

Para realizar las mediciones de potencia, como se mencionó en el capítulo 2, las antenas deben encontrarse en la región lejana o zona de Fraunhofer para lograr una definición correcta del patrón de radiación de antenas.

Para la antena el límite entre las regiones se calculó de la siguiente manera utilizando la ecuación 5.1, las antenas deben estar alejadas superando este valor.

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (5.1)$$

En donde D es la mayor dimensión lineal de la antena y λ esta definida por la siguiente ecuación 5.2

$$\lambda = \frac{C_0}{f} \quad (5.2)$$

λ : es la longitud de onda que se mide en m

C_0 : es la velocidad de la luz en el vacío que vale $3 \cdot 10^8$ m/s

f : es la frecuencia que se mide en Hz

Para las distintas antenas de prueba se procede a calcular el límite de campo lejano con la ecuación 5.1, obteniendo la tabla 5.1 que resulta en la distancia mínima de separación entre antenas. Los resultados de la pruebas realizadas con las antenas descritas en esta tabla se encuentran en el **Anexo B**.

Frecuencia	Tipo de Antena	Dimensión D	Campo Lejano
1090 MHz	Dipolo	0.17 m	21.01 cm
1090 MHz	Vivaldi	0.1 m	7.27 cm
1770 MHz	Microstrip Grande	0.082 m	7.94 cm
1770 MHz	Vivaldi	0.1 m	11.81 cm
1850 MHz	Trébol	0.05 m	3.09 cm
1850 MHz	Vivaldi	0.1 m	12.34 cm
2270 MHz	Vivaldi	0.1 m	15.14 cm
2270 MHz	Logarítmica	0.1 m	15.14 cm
2400 MHz	Microstrip Pequeña	0.055 m	4.84 cm
2400 MHz	Divisor de Potencia	0.12 m	23.06 cm
2400 MHz	Logarítmica	0.1 m	16.01 cm
2800 MHz	Girasol	0.047 m	4.12 cm
2800 MHz	Vivaldi	0.1 m	18.68 cm
2800 MHz	Logarítmica	0.1 m	18.68 cm

Tabla 5.1: Cálculo del límite de campo lejano para las antenas probadas

Por lo tanto, las antenas deberán estar separadas superando el valor del campo lejano para las

pruebas efectuadas, dependiendo de la frecuencia de operación de la antena en estudio.

5.2. Puesta en Marcha del Equipo

En esta sección se detallarán todas las configuraciones que se deben hacer para realizar una medición correcta.

5.2.1. Configuración del Generador de señales RF

Se puede utilizar cualquier tipo de generador de señales RF como el NI PXI. Se debe configurar la frecuencia de prueba y un nivel de potencia. De la salida del generador de señales se conecta un cable directamente al conector de entrada de la torre transmisora. En la figura 5.1 (a) se muestra el cable conectado a la salida del generador de señales, y en la figura 5.1 (b) se muestra el cable conectado en el conector de la torre de transmisión. En el otro extremo del conector de la torre de transmisión se coloca la antena transmisora. Las conexiones completas para la parte de transmisión se presentan en la figura D.11.

5.2.2. Configuración de la Torre de Recepción

La Torre de recepción cuenta con componentes en la parte superior y en la parte inferior. La parte superior cuenta con algunos elementos que son desmontables del eje principal. Es necesario quitar estos elementos para el caso de:

- Cambiar las baterías
- Colocar un filtro de RF ó un LNA diferente

Todos los componentes que no son intercambiables están atornillados y no es necesario ninguna configuración adicional. Los componentes que se pueden intercambiar están sujetos mediante ranuras y se los puede retirar fácilmente si se los desconecta. Es necesario colocar las baterías y un filtro RF centrado en la frecuencia de prueba para realizar la medición. La parte superior de esta torre se muestra en la figura 5.3. Para retirar la cubierta se debe seguir los siguientes pasos:

1. Desconectar la antena
2. Desconectar el conector
3. Retirar el soporte A del eje principal deslizándolo hacia arriba
4. Retirar la cubierta de metal del eje principal deslizándola hacia arriba

Los procedimientos posteriores para realizar la puesta en marcha del equipo se encuentran en el **Apéndice D**.



a)



b)

Figura 5.1: Conexión de (a) Generador de Señales (b)Entrada del conector de la torre TX



Figura 5.2: Conexión Final de la Transmisión

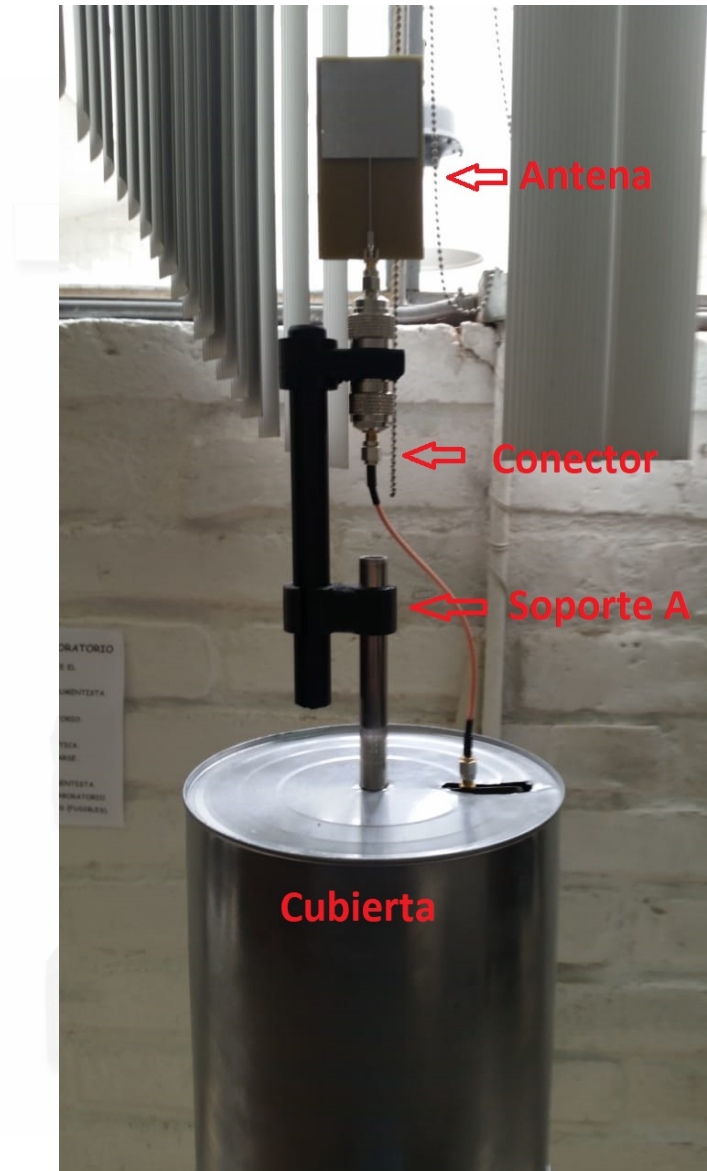


Figura 5.3: Parte Superior de la Torre de Recepción



5.3. Consumo de Corriente

El consumo total de corriente es de 260 mA. Con una autonomía aproximada de 20 minutos por Batería, el tiempo suficiente para realizar hasta 15 pruebas de mediciones. El consumo de corriente de cada elemento es:

- Tarjeta Detector Analog Devices : 120 mA
- Amplificador LNA : 80 mA
- Modulo Bluetooth : 35 mA
- Arduino Nano : 15 mA
- Otros : 10 mA



Capítulo 6

Resultados

Se indican los resultados finales obtenidos para una antena microstrip, un arreglo de antenas y una antena trébol. Se realiza una comparación entre los resultados obtenidos y las predicciones teóricas de los patrones de radiación.

6.1. Resultados Preliminares

En el capítulo anterior se realizó el cálculo del límite de campo lejano para las antenas, los resultados para las tres antenas en prueba son:

1. **Antena Microstrip 2.4 GHz:** 7.94 cm.
2. **Arreglo de Antenas 2.4 GHz:** 23.06 cm.
3. **Antena Trébol 1850 MHz:** 3.09 cm.

Teniendo en cuenta el límite del campo lejano para estas tres antenas en prueba, se colocó las torres de transmisión y recepción a una distancia que sea mayor que este límite. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

6.1.1. Prueba de la Antena Microstrip a una frecuencia de 2.4 GHz

Las torres de transmisión y recepción se separaron a una distancia de 25 cm. El generador de RF fue configurado a una frecuencia de 2.4 GHz. Los resultados obtenidos utilizando el detector RMS y logarítmico se presentan en la figura 6.1. Los patrones de radiación se presentan en dBm en la parte izquierda de la figura y en vatios en la parte derecha.

Posteriormente se realizó una comparación de los patrones de radiación obtenidos y teóricos. Para esta comparación se normalizaron los datos obtenidos y se graficaron los patrones de radiación en coordenadas polares y rectangulares. Los resultados se presentan en la figura 6.2, donde la gráfica de color rojo corresponde al patrón obtenido por el sistema, mientras que la gráfica de color azul corresponde al patrón teórico.

6.1.2. Prueba de un Arreglo de Antenas

Esta prueba es realizada con un arreglo de antenas. Se ha utilizado el divisor de potencia [42] de cuatro puertos con una diferencia de al menos 3dB entre los puertos, es decir, entre el puerto de salida 1 y el puerto de salida 4 se tiene la misma potencia o la menor diferencia posible. Adicionalmente, entre el puerto de salida 2 y el puerto de salida 3 se tiene la misma potencia o la mejor diferencia posible (figura 6.3).

Las torres de transmisión y recepción se separaron a una distancia de 35 cm. El generador de RF fue configurado a una frecuencia de 2.4 GHz. Como antena transmisora se ha utilizado una Vivaldi debido a que posee un ancho de banda grande y una gran ganancia.

Los resultados obtenidos utilizando el detector logarítmico se presenta en la figura 6.4. El patrón de radiación se presentan en dBm en la parte izquierda de la figura y en Watts en la parte derecha.

Se realizó una comparación de los patrones de radiación obtenidos y teóricos. Para esta comparación se normalizaron los datos obtenidos y se graficaron los patrones de radiación en coorde-

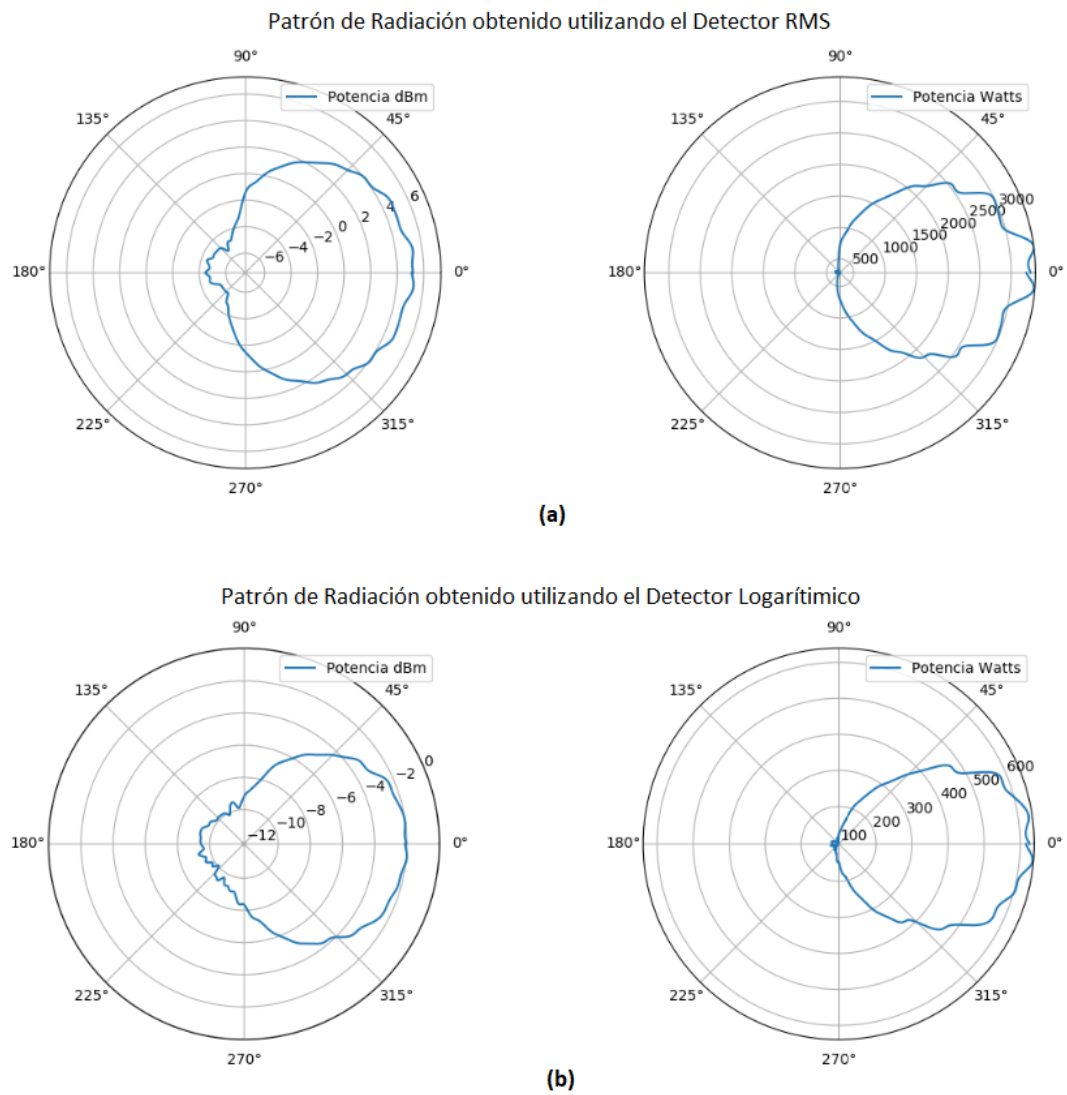


Figura 6.1: Patrón de Radiación Obtenido utilizando el Detector: (a) RMS; (b) Logarítmico

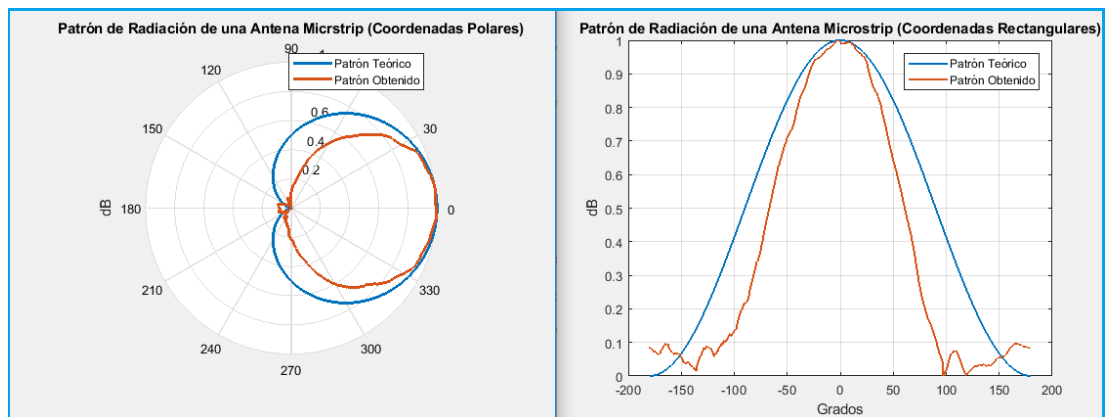


Figura 6.2: Comparación de los Patrones de Radiación en Coordenadas: (Izquierda) Polares; (Derecha) Rectangulares

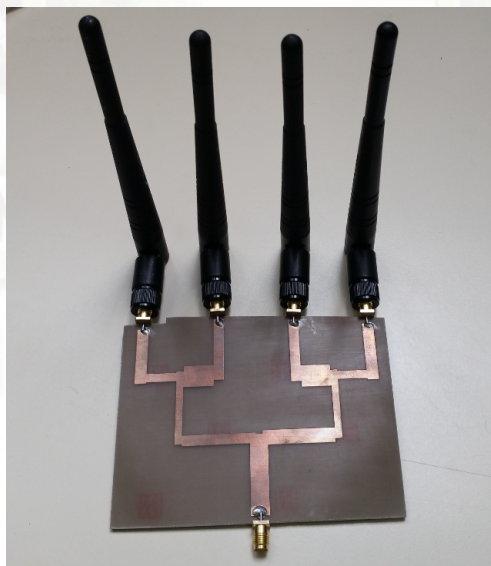


Figura 6.3: Arreglo binomial de antenas omnidireccionales

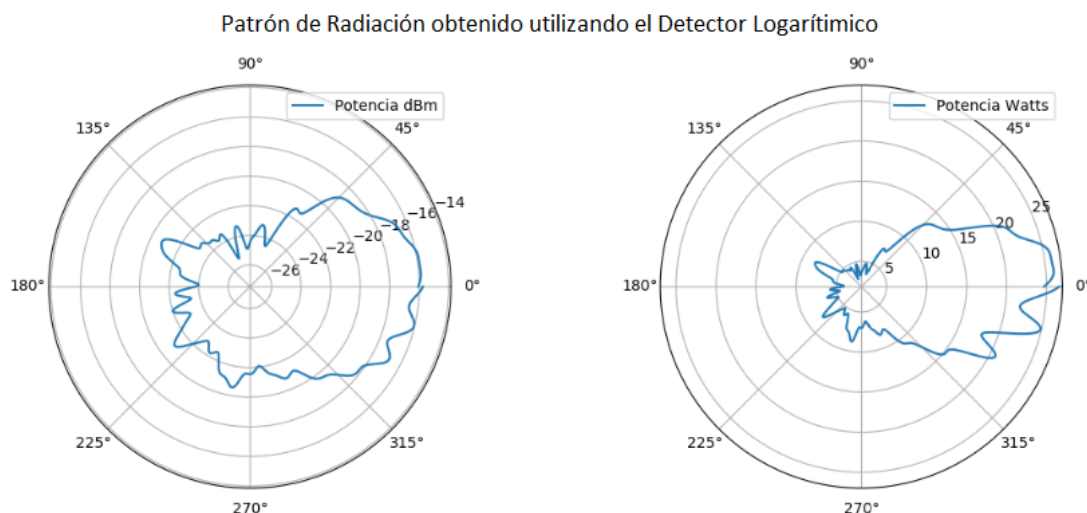


Figura 6.4: Patrón de Radiación Obtenido utilizando el Detector Logarítmico

nadas polares y rectangulares. Los resultados se presentan en la figura 6.5, donde la gráfica de color rojo corresponde al patrón obtenido por el sistema, mientras que la gráfica de color azul corresponde al patrón teórico.

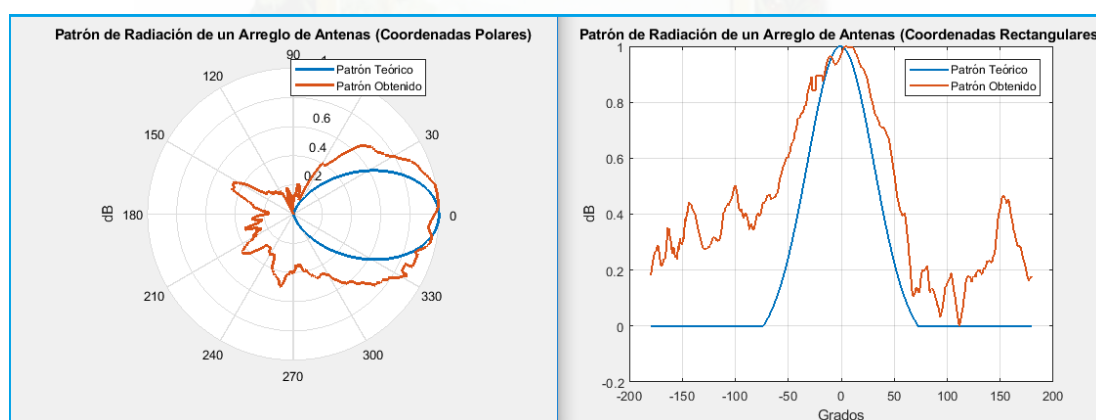


Figura 6.5: Comparación de los Patrones de Radiación en Coordenadas: (Izquierda) Polares; (Derecha) Rectangulares

6.1.3. Pruebas con la Antena Trébol

Para esta prueba las torres de transmisión y recepción se separaron a una distancia de 25 cm. El generador de RF fue configurado a una frecuencia de 1850 MHz. Como antena transmisora

se utilizó la antena Vivaldi debido a su gran ancho de banda y ganancia.

Los resultados obtenidos utilizando el detector RMS y logarítmico se presentan en la figura 6.6. Los patrones de radiación se presentan en dBm en la parte izquierda de la figura y en Watts en la parte derecha.

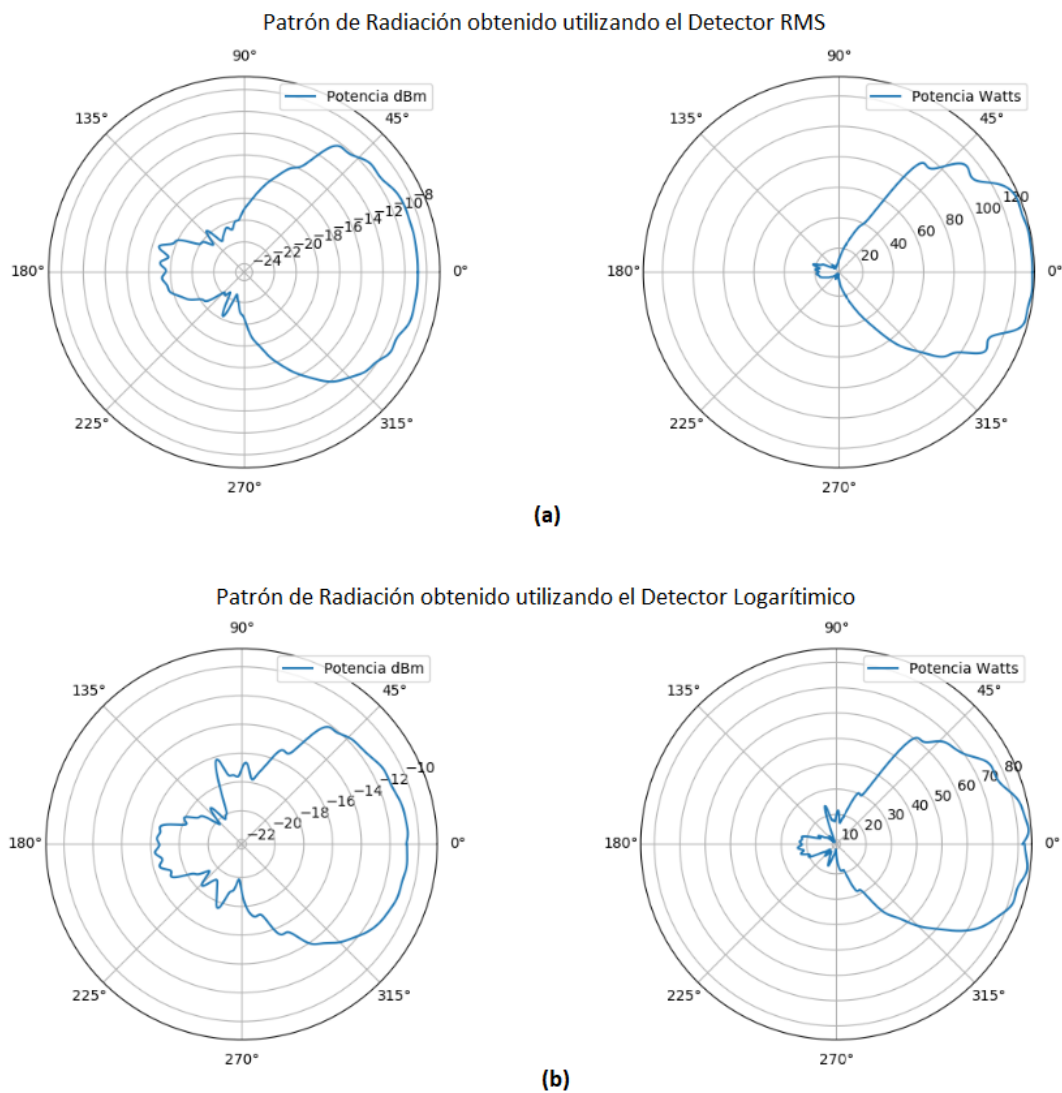


Figura 6.6: Patrón de Radiación Obtenido utilizando el Detector: (a) RMS; (b) Logarítmico

Posteriormente se realizó una comparación de los patrones de radiación obtenidos y teóricos. Para esta comparación se normalizaron los datos obtenidos y se graficaron los patrones de

radiación en coordenadas polares y rectangulares. Los resultados se presentan en la figura 6.7, donde la gráfica de color rojo corresponde al patrón obtenido por el sistema, mientras que la gráfica de color azul corresponde al patrón teórico.

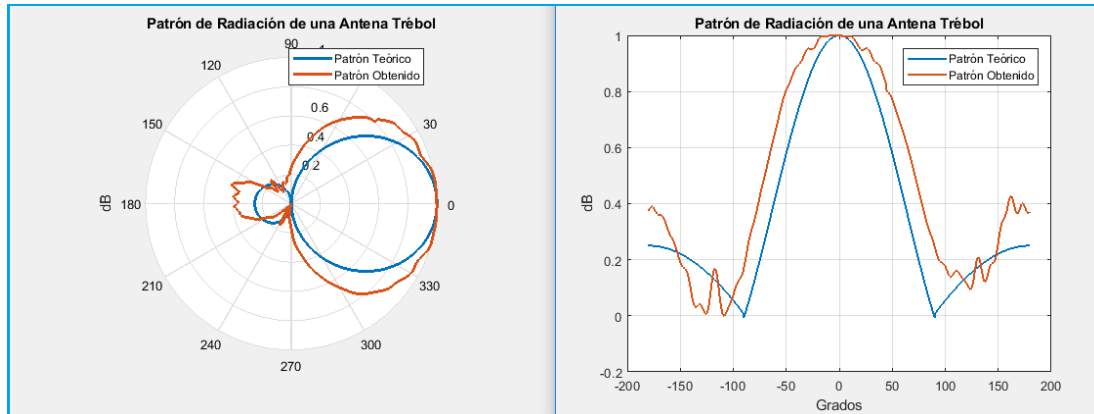


Figura 6.7: Comparación de los Patrones de Radiación en Coordenadas: (Izquierda) Polares; (Derecha) Rectangulares



Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

Se presentan las conclusiones del trabajo de titulación realizado así como la interpretación de los resultados, las limitaciones que se encontraron en el proceso y finalmente, se proponen maneras de ampliar la investigación a futuro.

7.1. Conclusiones

Con la culminación del sistema didáctico para la obtención de patrones de radiación de 1 MHz a 4GHz y al haber cumplido con los objetivos planteados, se puede citar las siguientes conclusiones:

Utilizando el detector RMS se obtuvo un rango dinámico de 61 dB. Con el detector LOG se obtuvo un rango dinámico de 78 dB, el fabricante especifica en este detector un rango de 80 dB, aunque en la practica el dispositivo no alcanzó este rango debido a su propia tolerancia de ± 3 dB.

Mediante la implementación de un amplificador LNA con una ganancia de 20 dB se aumentó el rango dinámico. Teniendo en cuenta las pérdidas de los elementos, se obtuvo una sensibilidad de -69 dBm, con la posibilidad de utilizar dos amplificadores LNA en serie para ampliar la sensibilidad a -85 dBm.

Se implementó un sistema de comunicación inalámbrica entre la parte superior e inferior de la torre de recepción para la transferencia de datos, esto resuelve el problema y las dificultades con el cableado que tuvo el sistema inicial.

Se diseñó un programa en el lenguaje Python que controla y sincroniza el sistema. El programa implementa una interfaz gráfica que controla todo el proceso de medición automáticamente.

Debido a que no se contó con una cámara anecoica, se diseñaron y utilizaron filtros de RF en la frecuencia de prueba. Se comprobó que la utilización de estos filtros mejoraba el patrón de radiación obtenido.

Si bien, los fabricantes de los detectores de potencia de señal radioeléctrica especifican la curva de respuesta de estos dispositivos, se comprobó en la práctica que éstas no eran tan exactas. Por lo tanto, se realizó una calibración de los detectores RMS y LOG. Se tomaron muestras a las salidas de los detectores que permiten obtener un valor en mili-Volts proporcional a la potencia de entrada y se realizó un barrido de potencia de transmisión desde los -60 dBm hasta los +19 dBm, mientras se mantenía la frecuencia constante de 1090 MHz. En la práctica se logró comprobar que al aplicar directamente una señal RF configurada a una frecuencia diferente, la respuesta del dispositivo era similar hasta los 4 GHz. Mediante este proceso se obtuvo la curva de respuesta con una mejor aproximación de cada detector.

Las pruebas realizadas con diferentes antenas se compararon con las predicciones teóricas de los patrones de radiación. Debido a que el laboratorio no cuenta con un equipo de medición del patrón de radiación de antenas de referencia, los resultados obtenidos no se validaron con un sistema práctico. Sin embargo, los resultados obtenidos verifican una muy buena aproximación del sistema diseñado con las predicciones teóricas obtenidas mediante simulación, consiguiendo resultados alentadores.



7.2. Recomendaciones

Un factor muy importante en la captura de los datos es la ubicación de las torres. Al no encontrarse las torres a una distancia de separación apropiada, como se indica en la revisión de radiación en campo lejano o región de Fraunhofer, no se puede obtener el patrón definido de la antena en prueba. Se debe considerar que las antenas deben estar ubicadas a la misma altura.

Otro dato de suma importancia es estar alejados cuando se proceda con la captura de datos, ya que la presencia de personas u objetos interfiere con la señal de RF, e incluso se puede llegar a tener valores fluctuantes, dando lugar a mediciones muy inestables. Mantener una distancia de al menos dos metros es recomendable.

Para la determinación del patrón de radiación de una antena, debido a su amplio ancho de banda, es necesario utilizar filtros de RF, y realizar las mediciones en ambientes con poca presencia de radiaciones extrañas a la frecuencia de prueba.

No esta demás decir que el sistema didáctico está expuesto al polvo y cada cierto tiempo se recomienda una limpieza en especial la parte del motor donde se acumula polvo debido a la grasa que utiliza como un medio de lubricación.

A pesar de lo anotado, el equipo didáctico opera con normalidad con las precauciones mencionadas.



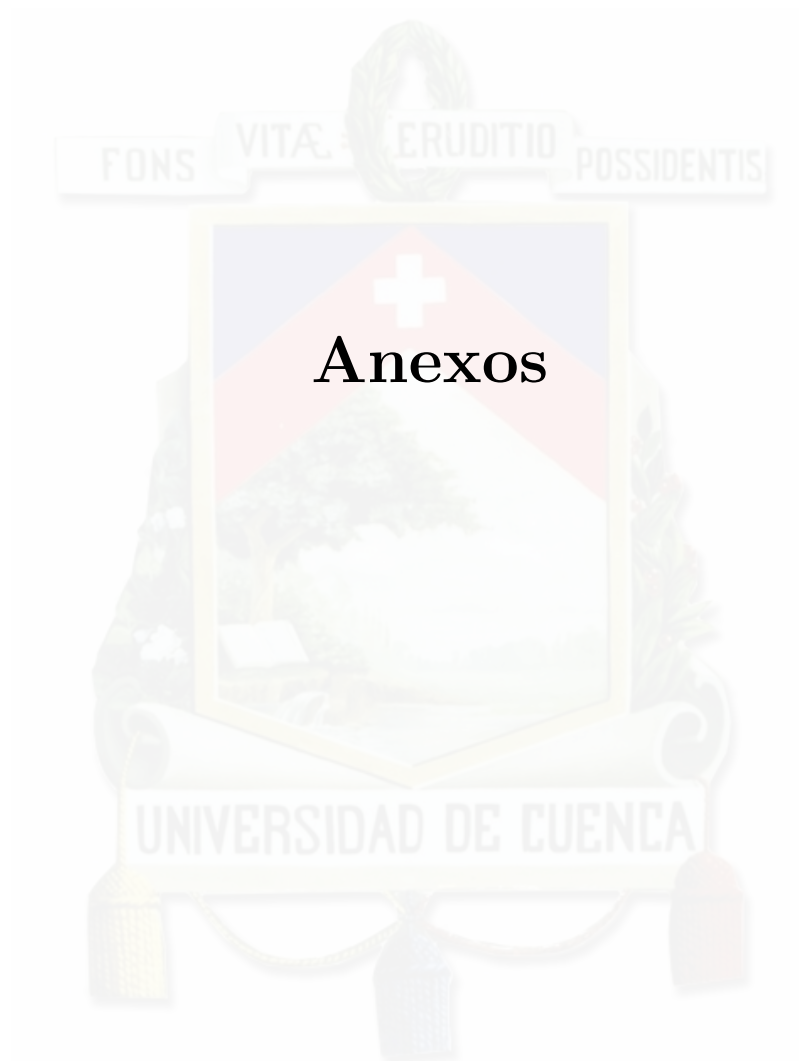
7.3. Trabajos Futuros

Se explica cómo pueden ser mejorados los resultados obtenidos o ampliados con futuras investigaciones. Se presentan los diferentes procesos que pueden ser mejorados en estudios posteriores y que no fueron tomados en cuenta a continuación:

Los detectores de potencia RMS o LOG utilizados podrían ser útiles para el desarrollo de un medidor de RNI para monitorizar niveles de campo eléctrico, magnético ó electromagnético.

Para la transmisión de datos se está utilizando comunicación Bluetooth que opera a una frecuencia de 2.4 GHz. Esta comunicación puede ser reemplazada utilizando luz visible como medio para transmitir datos. En el área de las Comunicaciones de Luz Visible, VLC se centra en la parte del espectro electromagnético que los seres humanos pueden ver, se ha demostrado que VLC no interfiere con las señales de RF y puede ser añadida a una red existente sin introducir nueva interferencia.

Se plantea implementar un sistema de medición o aviso de carga de batería, cuyo nivel se indique en la interfaz gráfica desarrollada en Python como un indicativo de su carga actual. Esto podría ser muy útil debido a que es necesario desarmar parte de la maqueta para llegar a las baterías y extraerlas.





Apéndice A

Diseño de Filtros RF

Se presenta en el software ADS el diseño y desarrollo completo del filtro de alta frecuencia de pasa banda a una frecuencia de 1,77 GHz. Este es uno de los objetivos específicos del trabajo de titulación.

A.1. Proceso de diseño de Filtros RF

Se elige el filtro Chebyshev con rizado de 0,5 dB en banda de paso [31]. El diseño del filtro prototipo utiliza líneas de microcinta MLIN y MCLIN. La herramienta Advance Design Simulation ADS, se utiliza para el diseño y la simulación del filtro de RF.

Este modelo de diseño y construcción es igual para los demás tipos de filtros, variando su frecuencia central y ancho de banda, todos los filtros diseñados son de tercer orden.

El filtro Chebyshev es un filtro con una banda de transición más abrupta que el filtro Butterworth [25], no obstante presenta un rizado en la banda pasante, la respuesta de un Butterworth se caracteriza por una respuesta plana en la banda pasante y no contiene rizado. La figura A.1 muestra una comparación de los filtros para $n = 3$, que significa de tercer orden.

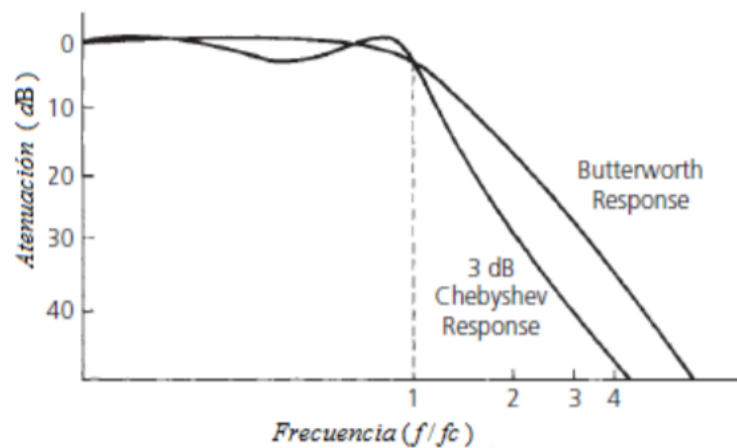


Figura A.1: Comparación entre filtro Butterworth y Chebyshev [25]

El filtro pasa banda Chebyshev pasa la frecuencia en banda de paso y proporciona atenuación para las frecuencias que se encuentran fuera de la banda de paso. Por lo tanto, actúa como circuito selectivo de frecuencia. Para satisfacer la aplicación efectuada, el filtro está diseñado en tamaño compacto, bajo costo de desarrollo con buena calidad en el rendimiento.

El diseño del filtro RF comienza con la necesidad de eliminar frecuencias no deseadas, estas frecuencias de pruebas son definidas por la frecuencia de operación de las antenas transmisoras y receptoras.

Una vez definido la frecuencia para este ejemplo de 1.77 Ghz, comenzamos con el diseño a través del programa ADS, se entiende que el lector ya tiene instalado el programa ADS [43].

Los siguientes pasos son acerca del programa ADS para iniciar el proceso de diseño:

1. Iniciar el programa ADS
2. Seleccionamos ADS Design Environment, presionamos OK



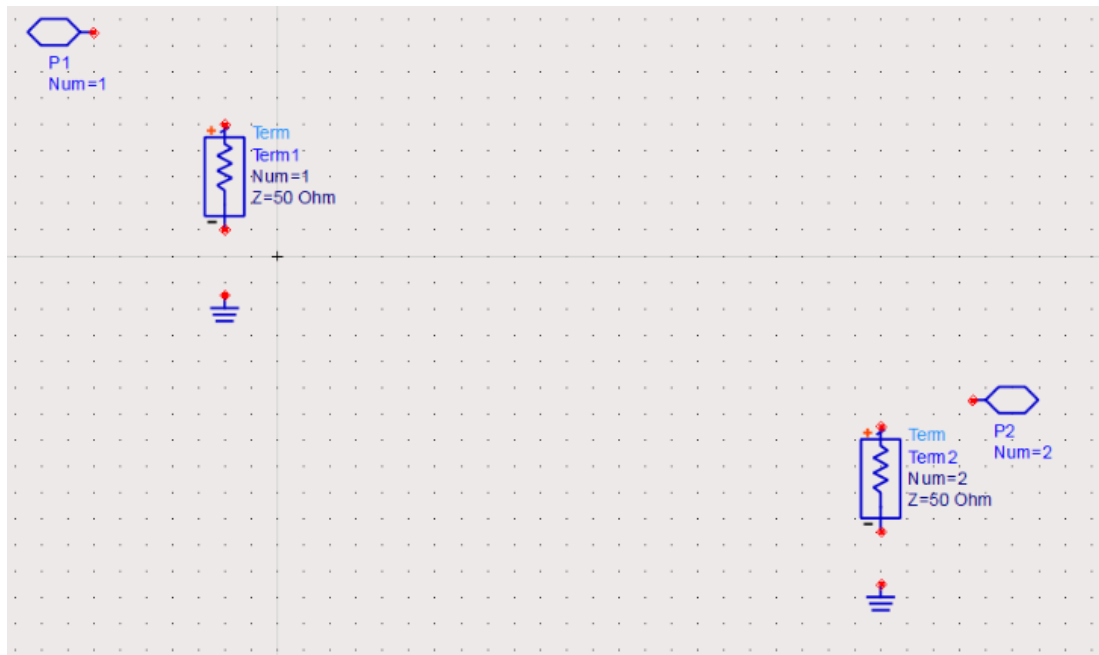
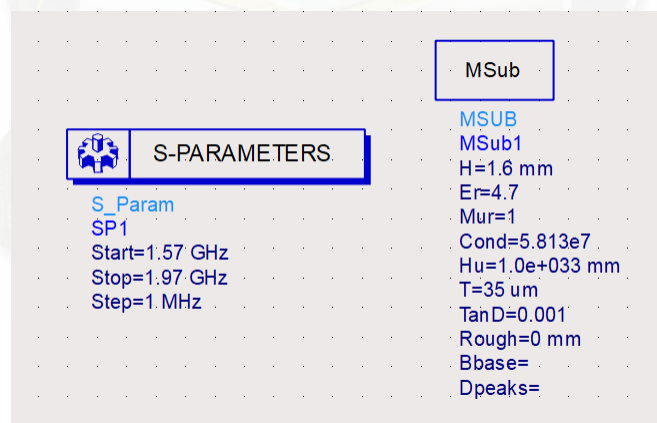
3. **File >New >Workspace**
4. **Next**
5. Definimos un nombre sin espacios para el proyecto por ejemplo **filtro1.77_wrk**
6. Además definimos la ubicación del proyecto, presionamos **Next>**
7. **Yes**
8. **Next>**
9. Definimos un nombre sin espacios para la librería por ejemplo **filtro1.77Ghz_lib**, presionamos **Next>**
10. Seleccionamos **Standard ADS Layers, 0.0001 millimeter layout resolution**, presionamos **Next>**
11. **Finish**
12. Se crea un **New Schematic**
13. En **Cell** ingresamos un nombre por ejemplo **filtro1.77ghz**, presionamos **OK**
14. **Next>**
15. Seleccionamos **Empty Circuit**, presionamos **Next>**
16. Seleccionamos **dos números de pines**, presionamos **Next>**
17. **Finish**
18. Nos indica que el esquemático fue generado exitosamente la cual le damos en **Close**
19. Nos dirigimos a **Insert >Component >Component Library**
20. En **Search** buscamos Term y nos indica que esta ubicado en la librería **Simulation-S_Param**
21. Creamos dos **Term** de $50\ \Omega$ como se ve en la figura [A.2](#)
22. En la misma librería **Simulation-S_Param** creamos un **S_Param**
23. En la librería **TLines-Microstrip** creamos un **MSub** como se ve en la figura [A.3](#)
24. Nos dirigimos a **Tools >LineCalc >Start LineCalc** y seleccionamos **MLIN**
25. Ingresamos los datos como en la figura [A.4](#) teniendo en cuenta la frecuencia central en este caso de 1.77 Ghz, no modificamos W y L, pero si colocamos en mm.
26. Importante colocar todo en mm, le damos click en **Synthesize** y nos indica un mensaje exitoso.
27. Nos dirigimos a **Tools >LineCalc >Place New Synthesized Component** y colocamos dos **MLIN**

Para el calculo de MCLIN se necesita realizar una serie de cálculos, al ser el filtro de tercer orden escogemos la fila numero tres, donde $N=3$ ver figura [A.5](#).

Se diseña las frecuencias de corte $F_{corte1} = 1,72Ghz$ y $F_{corte2} = 1,81Ghz$ y se aplican las siguientes ecuaciones [A.1,A.2,A.3](#) y [A.4](#).

Calculo de Delta Δ

$$\Delta = \frac{F_{corte2} - F_{corte1}}{F_{Central}} \quad (A.1)$$

Figura A.2: Terminales Term de 50 Ω Figura A.3: **Msub** define las características el sustrato FR4 y **S_Param** define las frecuencias de simulación

LineCalc/mlin.lcs
z=50

File Simulation Options Help

Component
Type MLIN ID MLIN: MLIN_DEFAULT

Substrate Parameters

ID MSUB_DEFAULT

Er	4.700	N/A
Mur	1.000	N/A
H	1.600	mm
Hu	1.0e+033	mm
T	35.000	um
Cond	5.813e7	N/A
TanD	0.001	N/A
Rough	0.000	mm
DielectricLossModel	1.000	N/A
FreqForEpsrTanD	1.0e9	N/A
LowFreqForTanD	1.0e3	N/A
HighFreqForTanD	1.0e12	N/A

Physical

W 2.868310 mm

L 22.554700 mm

Synthesize Analyze

Electrical

Z0 50.000 Ohm

E_Eff 90.000 deg

Component Parameters

Freq 1.770 GHz

Wall1 mm

Wall2 mm

Figura A.4: Calculo de lineas MLIN

	0.5 dB Ripple										
N	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}	g_{11}
1	0.6986	1.0000									
2	1.4029	0.7071	1.9841								
3	1.5963	1.0967	1.5963	1.0000							
4	1.6703	1.1926	2.3661	0.8419	1.9841						
5	1.7058	1.2296	2.5408	1.2296	1.7058	1.0000					
6	1.7254	1.2479	2.6064	1.3137	2.4758	0.8696	1.9841				
7	1.7372	1.2583	2.6381	1.3444	2.6381	1.2583	1.7372	1.0000			
8	1.7451	1.2647	2.6564	1.3590	2.6964	1.3389	2.5093	0.8796	1.9841		
9	1.7504	1.2690	2.6678	1.3673	2.7239	1.3673	2.6678	1.2690	1.7504	1.0000	
10	1.7543	1.2721	2.6754	1.3725	2.7392	1.3806	2.7231	1.3485	2.5239	0.8842	1.9841

Figura A.5: Filtro de tercer orden con 0.5 dB de rizado

Para el primer acoplamiento

$$Z_0 J_1 = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_1}} \quad (\text{A.2})$$

Para el acoplamiento intermedio

$$Z_0 J_n = \frac{\pi \Delta}{2 \sqrt{g_{n-1} g_n}} \quad (\text{A.3})$$

Para $n=1,2,3,\dots,N$

Para el acoplamiento final

$$Z_0 J_{N+1} = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_N g_{N+1}}} \quad (\text{A.4})$$

Con ayuda del software de Excel, realizado por los autores se encuentran los valores para los respectivos acoplamientos

Primer acoplamiento:

Acoplamiento	Valor
$Z_0 J_1$	0.221813351

Tabla A.1: Primer Acoplamiento del Filtro

Acoplamiento intermedio:

Acoplamiento final:

Acoplamiento	Valor
$Z_0 J_2$	0.059359291
$Z_0 J_3$	0.059359291

Tabla A.2: Acoplamiento Intermedio del Filtro

Acoplamiento	Valor
$Z_0 J_1$	0.221813351

Tabla A.3: Acoplamiento Final del Filtro

Utilizando las ecuaciones para las impedancias de línea de modo par e impar, se tiene:

Para modo PAR

$$Z_{0e} = Z_0[1 + JZ_0 + (JZ_0)^2] \quad (\text{A.5})$$

Para modo IMPAR

$$Z_{0o} = Z_0[1 - JZ_0 + (JZ_0)^2] \quad (\text{A.6})$$

Donde $Z_0 = 50\Omega$

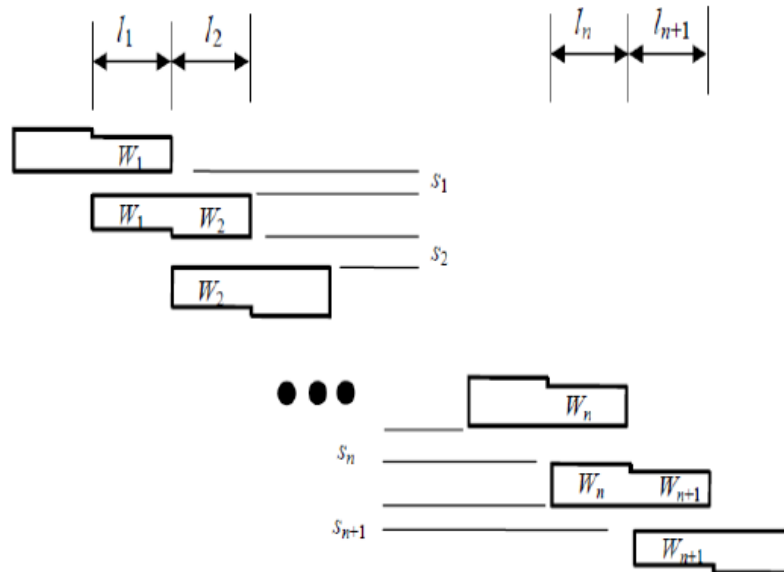


Figura A.6: Estructura generalizada para filtro de línea acoplada de microstrip. A partir de las ecuaciones anteriores podemos obtener impedancias características de modo par y impar

Aplicando las ecuaciones A.5 y A.6 se obtiene:

Una vez obtenidos los cuatro valores de las impedancias, tanto en modo par e impar se procede a calcular las dimensiones de MCLIN ver figura A.7.

PAR	Valor	IMPAR	Valor
Z_{0e1}	63.55072572	Z_{0o1}	41.36939057
Z_{0e2}	53.1441408	Z_{0o2}	47.20821173
Z_{0e3}	53.1441408	Z_{0o3}	47.20821173
Z_{0e4}	63.55072572	Z_{0o4}	41.36939057

Tabla A.4: Impedancias de Linea modo PAR e IMPAR

28. Nos dirigimos a **Tools >LineCalc >Start LineCalc** y seleccionamos MCLIN
Ingresamos las características del sustrato FR4, frecuencia central los cálculos realizados para las impedancias en ZE la impedancia par y ZO la impedancia impar, z_0 de 50Ω y $E_{EFF} = 90$ grados, W, S y L no se tocan pero debemos colocar en mm no modificamos nada mas y pulsamos Synthesize.
29. Importante colocar todo en mm, le damos click en **Synthesize** y nos indica un mensaje exitoso.
30. Nos dirigimos a **Tools >LineCalc >Place New Synthesized Component** y colocamos un MCLIN
31. Repetimos para cada impedancia par e impar
32. Colocamos en forma de cascada, conectamos y tenemos el resultado final como se aprecia en la figura A.8.
33. Por ultimo generamos el Layout en **Layout >Generate/Update Layout** y podríamos exportar a Autocad ver figura A.9.
34. Para finalizar se procede a simular y verificar su comportamiento, se hace un barrido de frecuencia entre 1.57GHz hasta 1.97GHz, en la figura A.10 se puede observar que se tiene un rizado aproximado de 0.5 dB
En donde los parámetros S_{11} es el coeficiente de reflexión del puerto de entrada y S_{21} es la ganancia directa
35. En la vida real con ayuda de un analizador vectorial de redes se comprueba el funcionamiento del filtro a 1.77 GHz ver figura A.11

Los filtros de RF diseñados ver figura A.12 muestran un buen resultado teórico y práctico.

En la siguiente Tabla A.5 se indica la frecuencia central del filtro y su respectivo ancho de banda, cada filtro tiene perdidas entre 8 a 10 dBm, el filtro crece de tamaño a menor frecuencia central.

LineCalc/mclin.lcs

File Simulation Options Help

Component

Type MCLIN ID MCLIN: MCLIN_DEFAULT

Substrate Parameters

ID MSUB_DEFAULT

Er	4.700	N/A
Mur	1.000	N/A
H	1.600	mm
Hu	1.0e+033	mm
T	35.000	um
Cond	5.813e7	N/A
TanD	0.001	N/A
Rough	0.000	mm
DielectricLossModel	1.000	N/A
FreqForEpsrTanD	1.0e9	N/A
LowFreqForTanD	1.0e3	N/A
HighFreqForTanD	1.0e12	N/A

Physical

W	2.825730	mm
S	3.363570	mm
L	22.603600	mm

Synthesize Analyze

Electrical

ZE	53.1441408	
ZO	47.20821173	
Z0	50.000	Ohm
C_DB	-10.000	N/A
E_Eff	90.000	deg

Component Parameters

Freq 1.770 GHz

Parameter(s) modified - Values are not consistent

Figura A.7: Parametros para encontrar MCLIN

Filtro	Ancho de banda
Filtro a 1090 MHz	BW 100 MHz
Filtro a 1770 MHz	BW 120 MHz
Filtro a 1850 MHz	BW 120 MHz
Filtro a 2270 MHz	BW 140 MHz
Filtro a 2800 MHz	BW 215 MHz

Tabla A.5: Distintos filtros utilizados en la maqueta

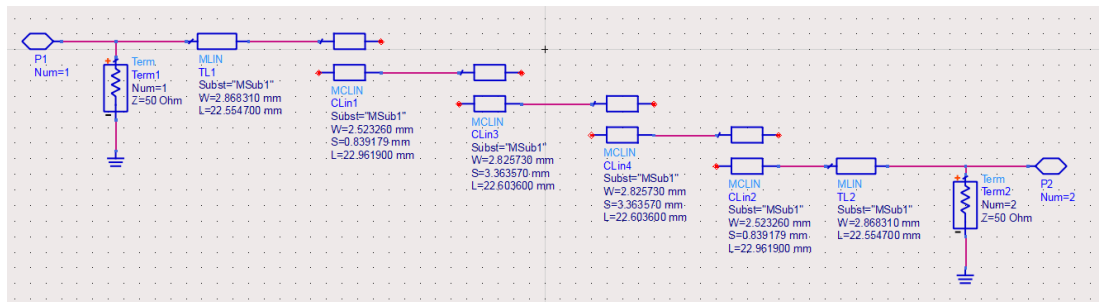


Figura A.8: Resultado final en el esquemático de ADS

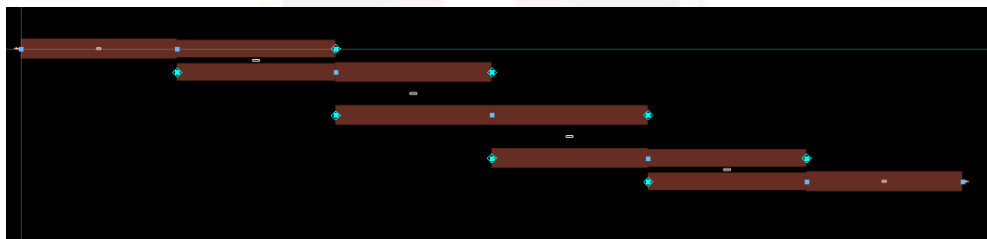


Figura A.9: Layout del filtro a 1.77 GHz

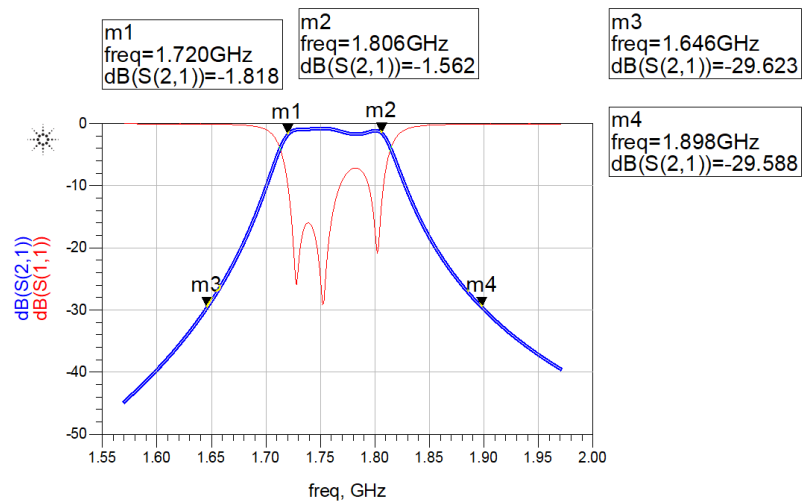


Figura A.10: Simulación del comportamiento del filtro de 1.77 GHz en ADS

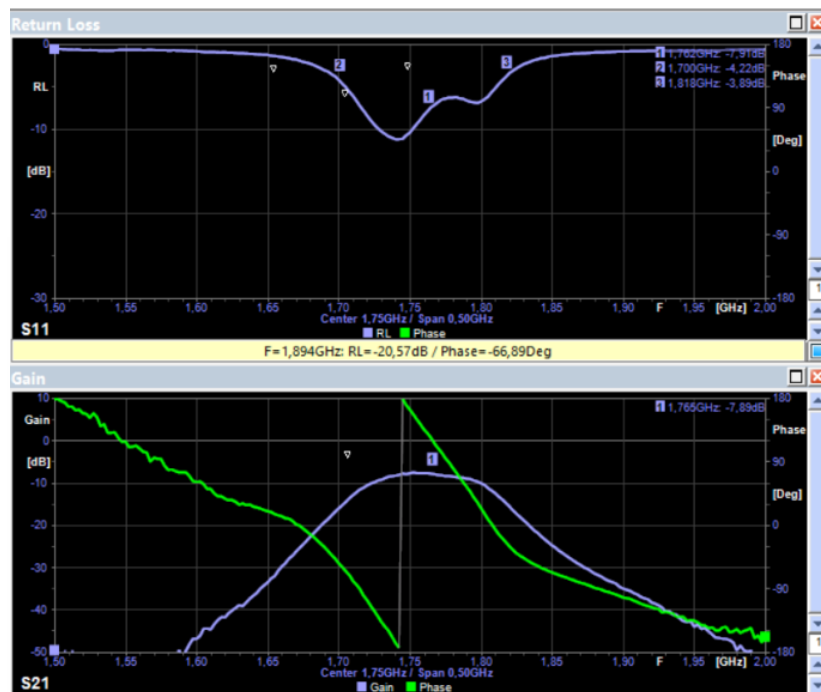


Figura A.11: Simulación del comportamiento del filtro de 1.77 GHz en la práctica

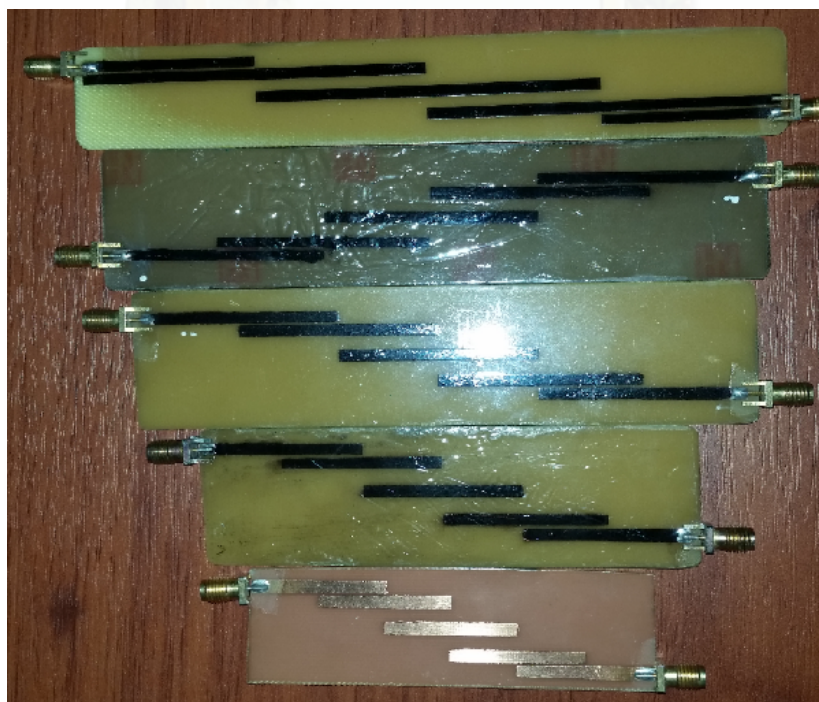


Figura A.12: Distintos tipos de filtros construidos



Apéndice B

Resultados Adicionales

Se presentan resultados de diferentes tipos de antenas para pruebas más extensas. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca, con el apoyo del PXI y Gigatronic 910 que son equipos de generación de RF.

B.1. Frecuencia de operación de distintas antenas

Para poder realizar la medición del patrón de radiación de las antenas adquiridas [9],[44], [45] se verificó la frecuencia de operación de las mismas utilizando el VNA que realiza un barrido de frecuencia desde 1 GHz hasta 6 GHz.

B.2. Resultados Adicionales

En cada prueba se toma en consideración la distancia de separación de las antenas respetando la distancia mínima como se obtuvo en el Capítulo 5, deben estar las antenas a la misma altura y las personas deben estar alejados 2 metros o más ya que solo la presencia cercana a las antenas interfiere, todas las siguientes pruebas son realizadas a una potencia de transmisión de +5dB valor máximo del PXI y en posición vertical, debemos tener en consideración las frecuencias aledañas a la frecuencia de prueba para no tener interferencias al momento de capturar las señales en el detector ver figura B.2.

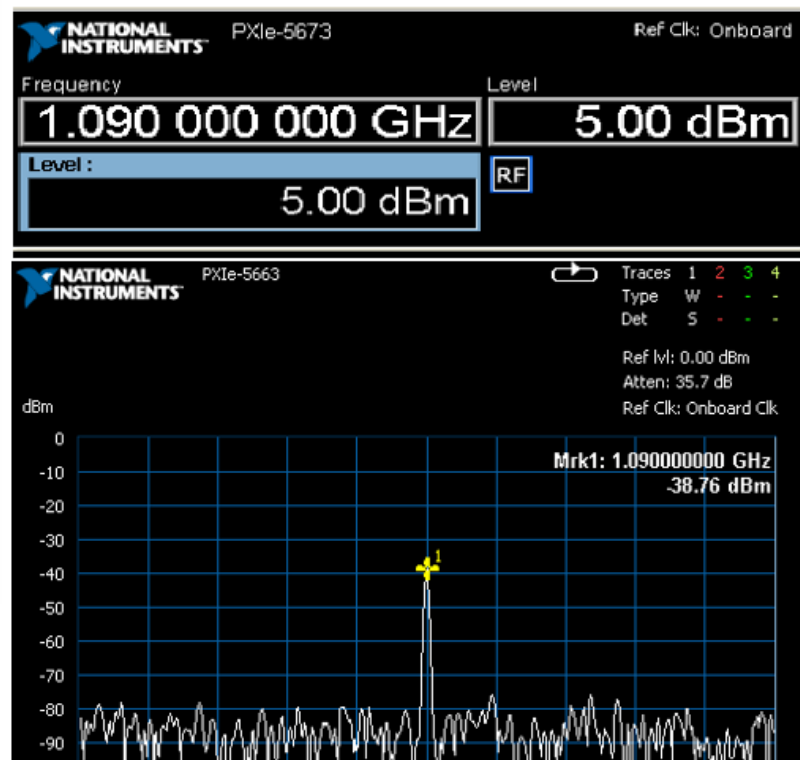


Figura B.1: Uso del PXI para transmitir y recibir a 1090 Mhz con potencia de +5dBm

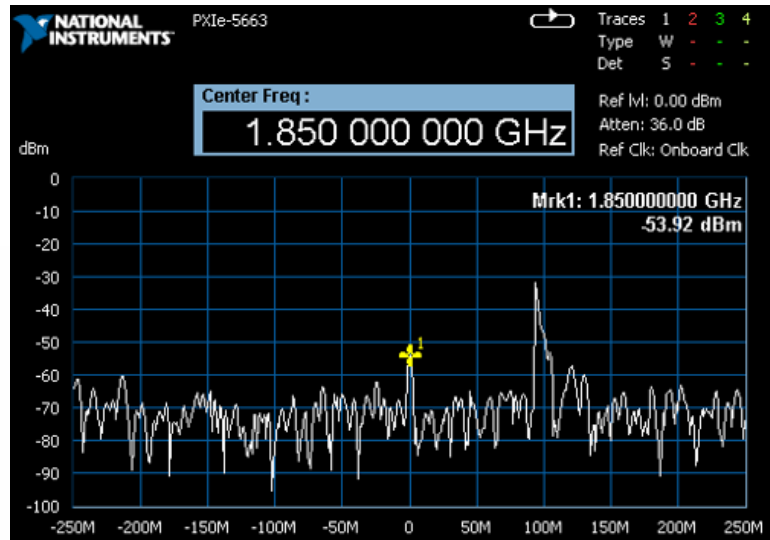


Figura B.2: Uso del PXI para verificar espectros aledaños a la frecuencia de prueba de 1850 Mhz

B.2.1. Pruebas en la Antena Vivaldi

Se realizaron pruebas a distintas frecuencias, todas separadas a 30 cm, comenzando a una frecuencia de 1090 MHz, 1770 MHz, 1850 MHz, 2270 MHz y 2800 MHz, se hace uso de los filtros RF sintonizado a estas frecuencias y se hace uso del detector RMS y del detector Logarítmico.

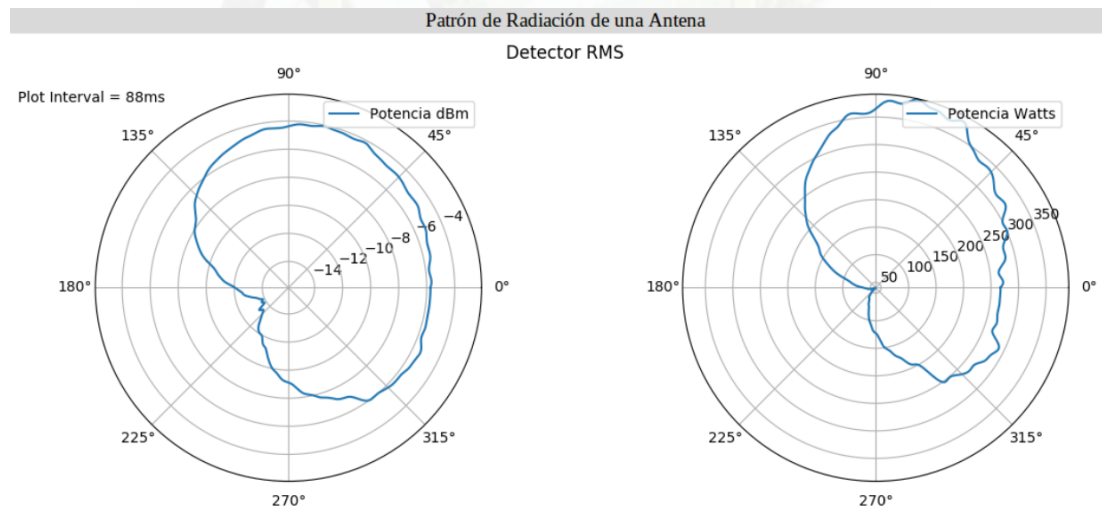


Figura B.3: Patrón de radiación de una Vivaldi a 1090 MHz uso del RMS y con etapa de filtrado digital

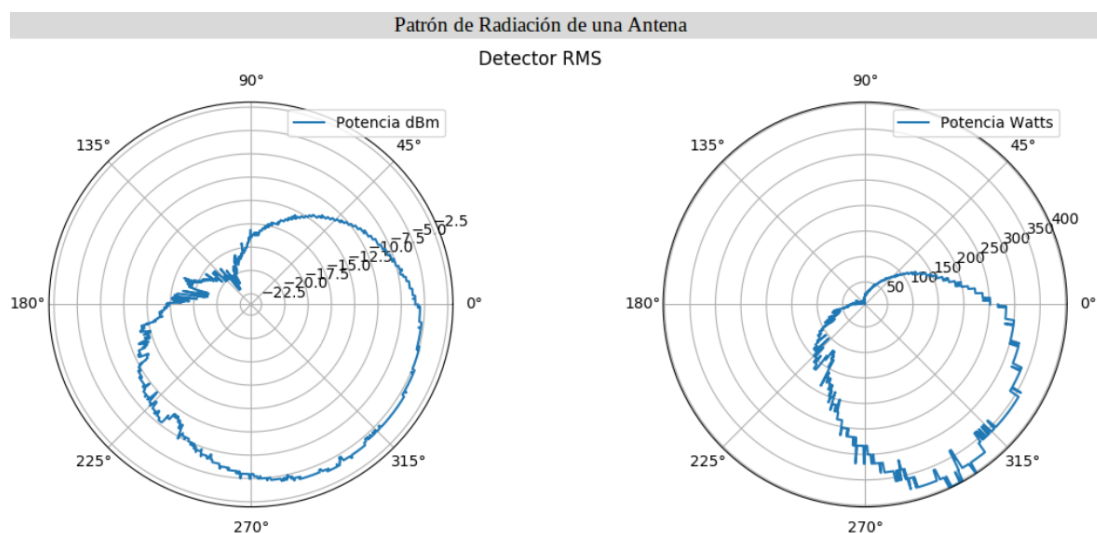


Figura B.4: Patrón de radiación de una Vivaldi a 1770 MHz uso del RMS y sin etapa de filtrado digital

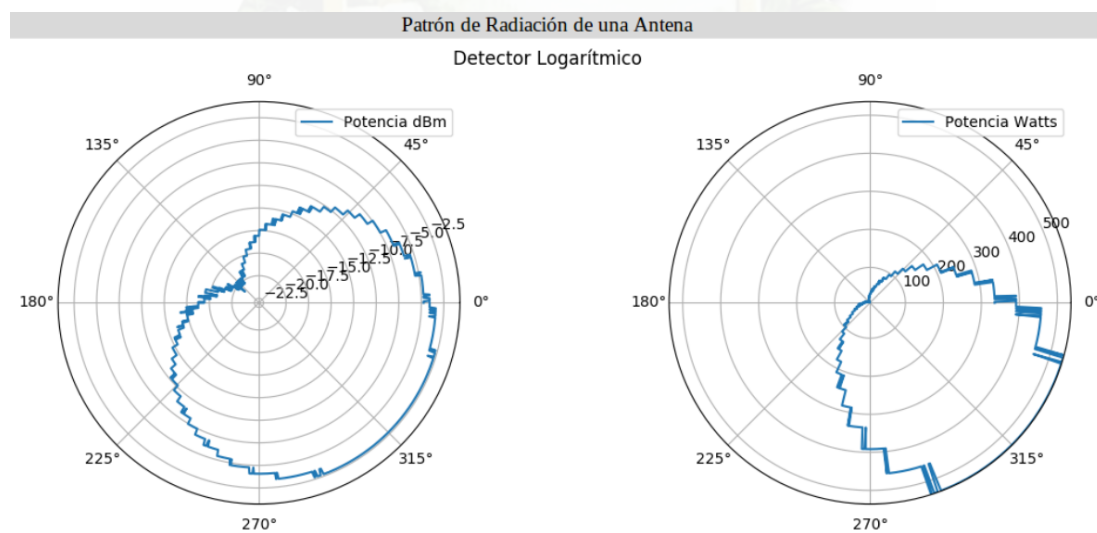


Figura B.5: Patrón de radiación de una Vivaldi a 1770 MHz uso del LOG y sin etapa de filtrado digital

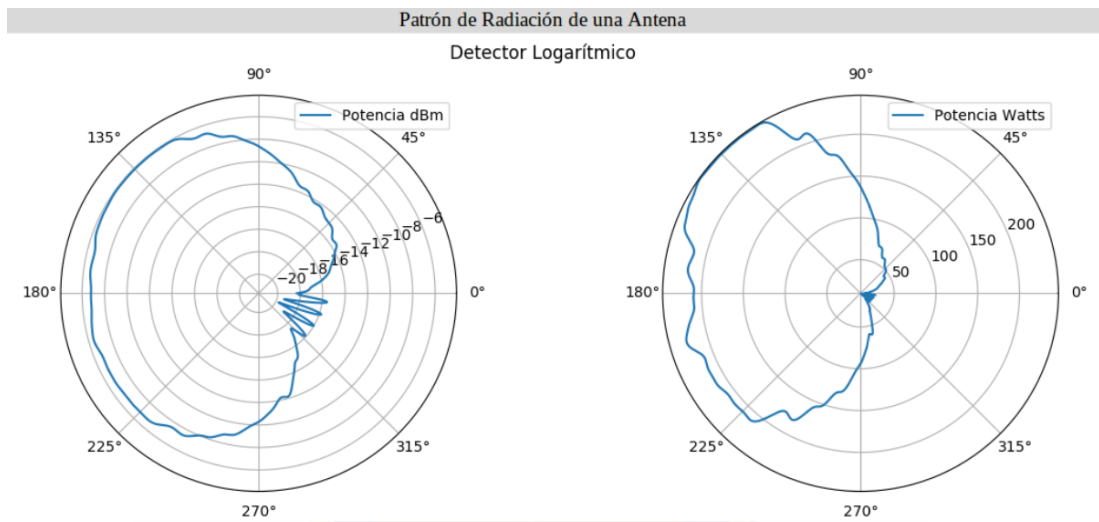


Figura B.6: Patrón de radiación de una Vivaldi a 1850 MHz uso del LOG y con etapa de filtrado digital

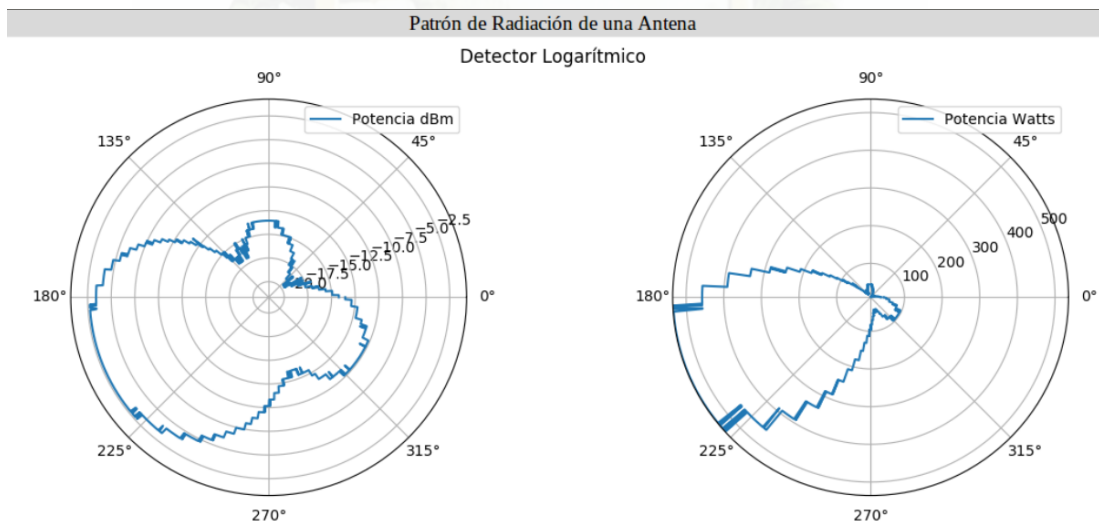


Figura B.7: Patrón de radiación de una Vivaldi a 2270 MHz uso del LOG y sin etapa de filtrado digital

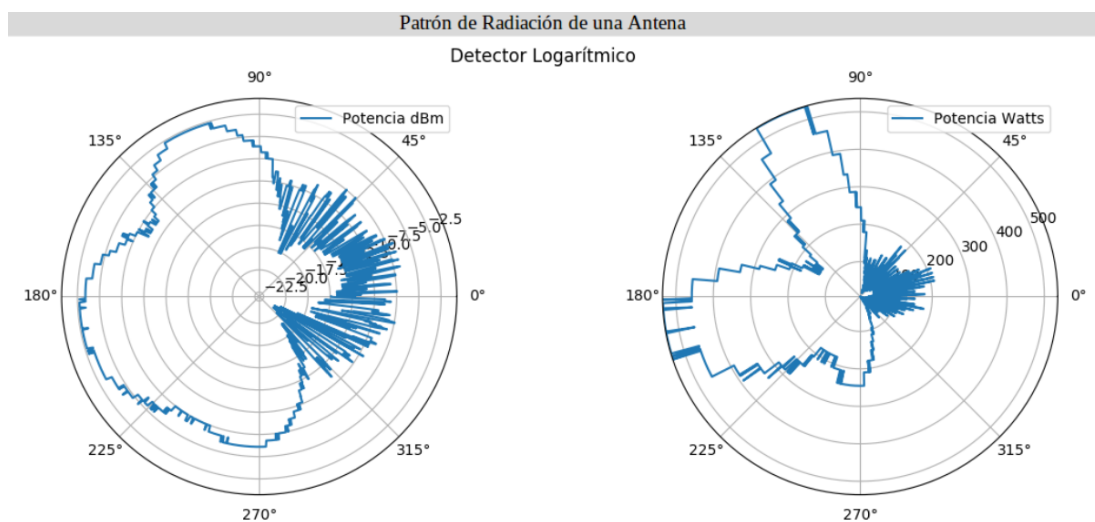


Figura B.8: Patrón de radiación de una Vivaldi a 2800 MHz uso del LOG y sin etapa de filtrado digital

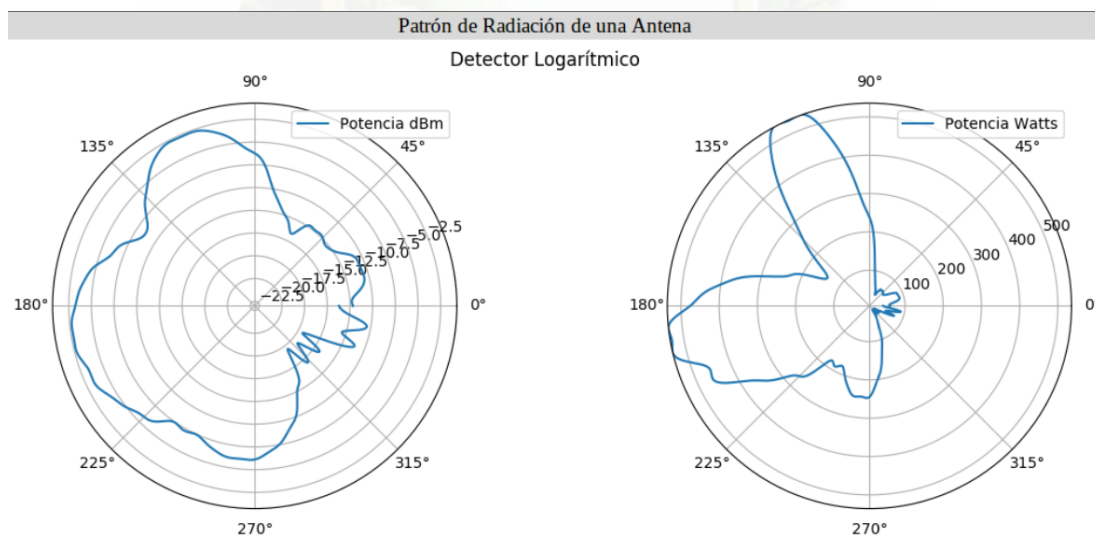


Figura B.9: Patrón de radiación de una Vivaldi a 2800 MHz uso del LOG y con etapa de filtrado digital

B.2.2. Pruebas en la Antena Logarítmica

Se realizaron pruebas a distintas frecuencias, todas separadas a 40 cm comenzando con una frecuencia de 2270 MHz, 2400 MHz y 2800 MHz, se hace uso de los filtros RF sintonizado a estas frecuencias y se hace uso del detector RMS y del detector LOG.

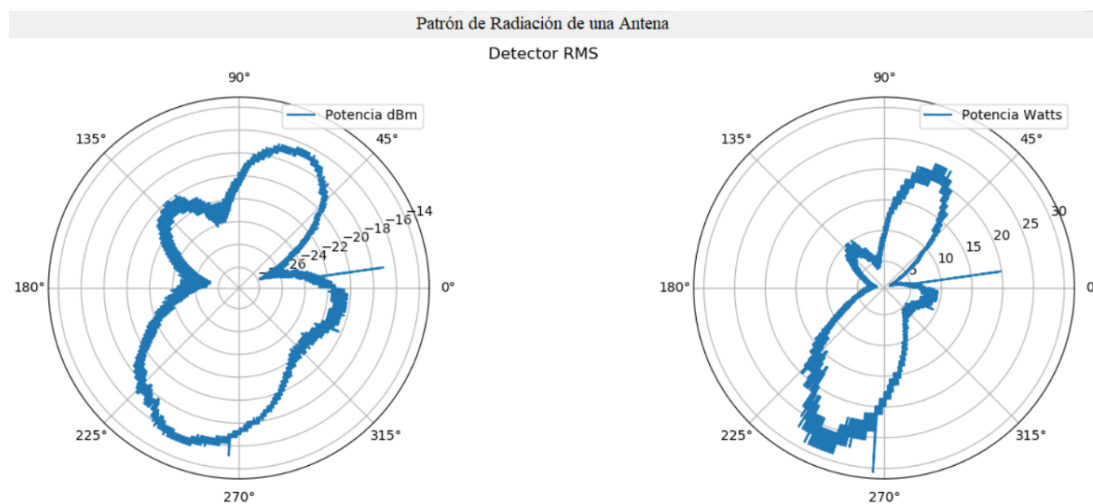


Figura B.10: Patrón de radiación de una Logarítmica a 2270 MHz uso del RMS y sin etapa de filtrado digital

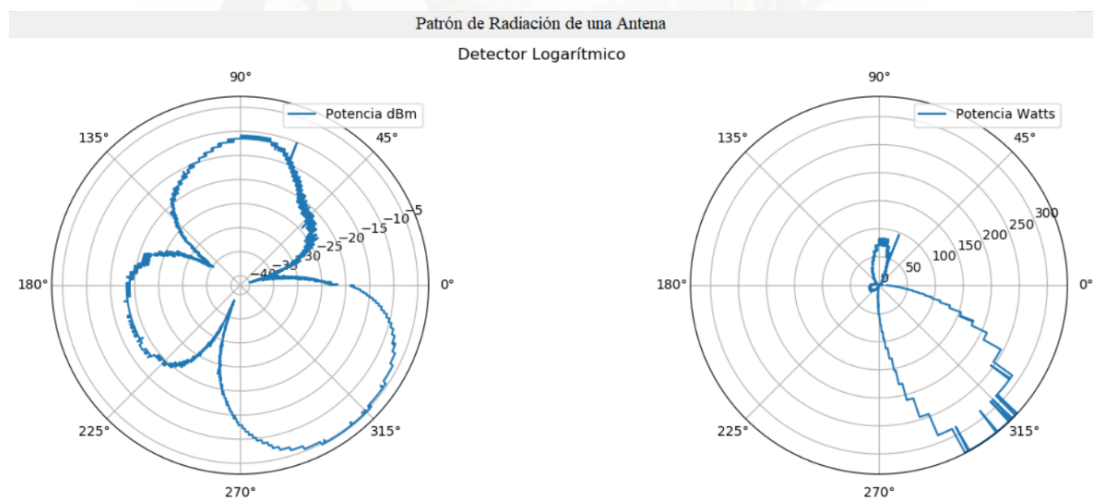


Figura B.11: Patrón de radiación de una Logarítmica a 2400 MHz uso del LOG y sin etapa de filtrado digital

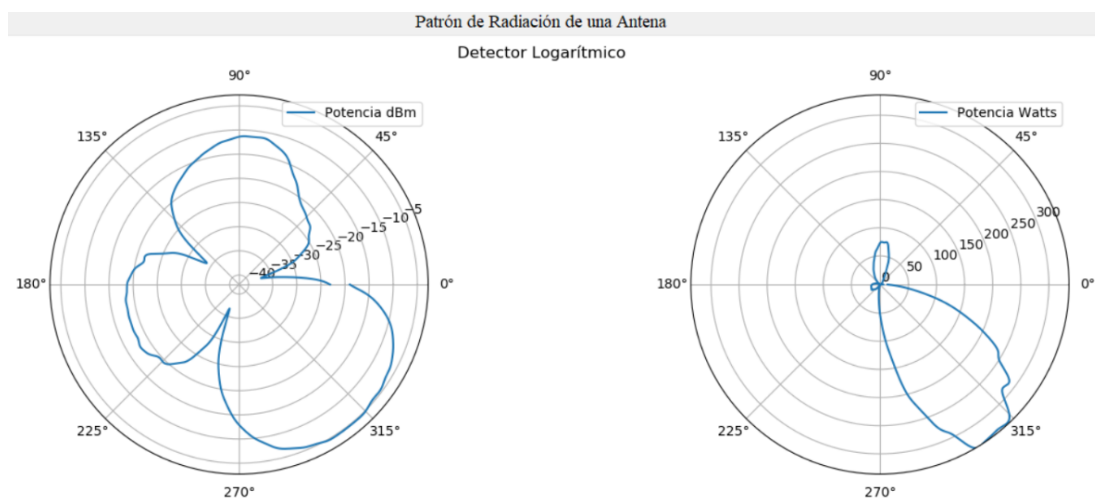


Figura B.12: Patrón de radiación de una Logarítmica a 2400 MHz uso del LOG y con etapa de filtrado digital

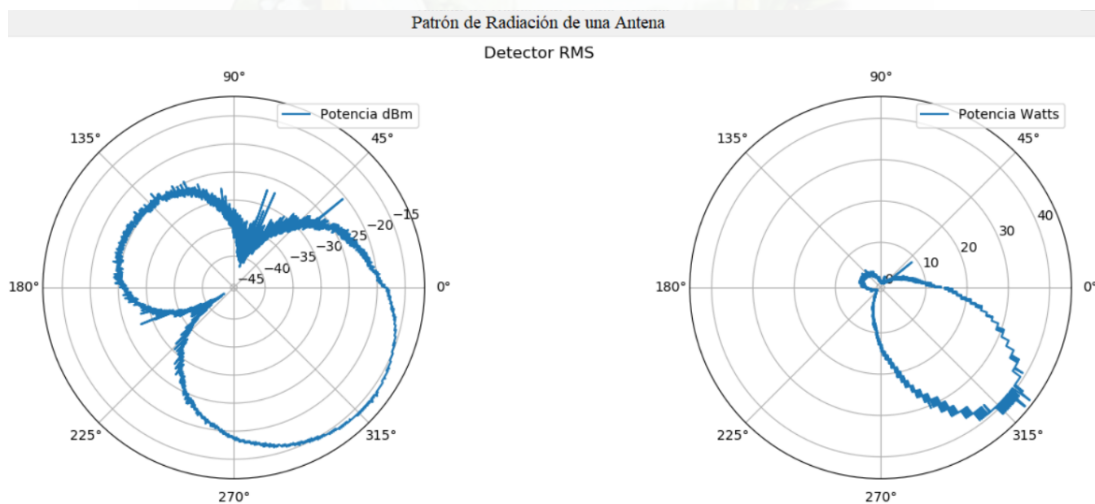


Figura B.13: Patrón de radiación de una Logarítmica a 2800 MHz uso del RMS y sin etapa de filtrado digital

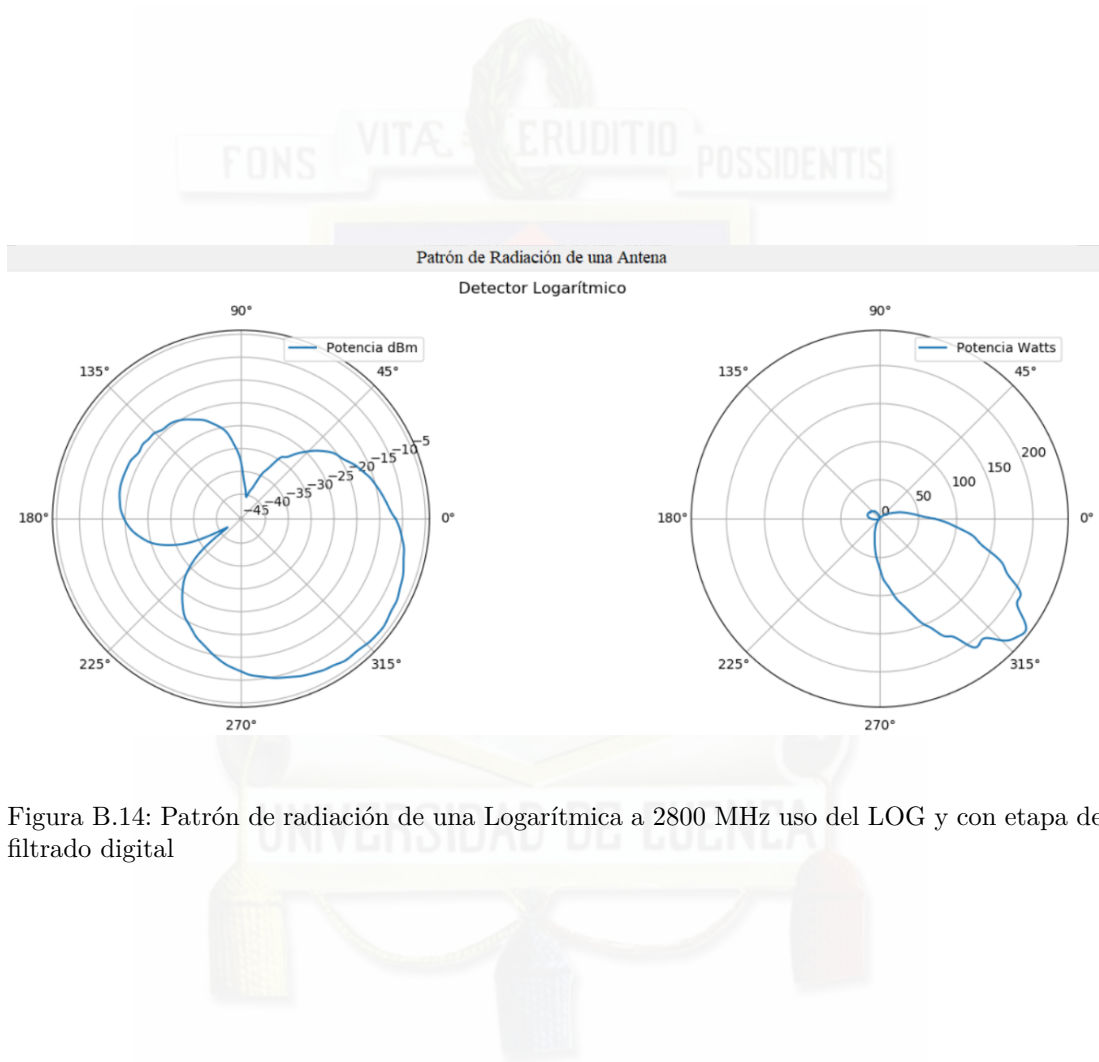


Figura B.14: Patrón de radiación de una Logarítmica a 2800 MHz uso del LOG y con etapa de filtrado digital

B.2.3. Pruebas en la Antena Dipolo

En esta prueba es realizada a una frecuencia de 1090 MHz con uso del filtro RF sintonizado a esta frecuencia y se hace uso de detector RMS y LOG.

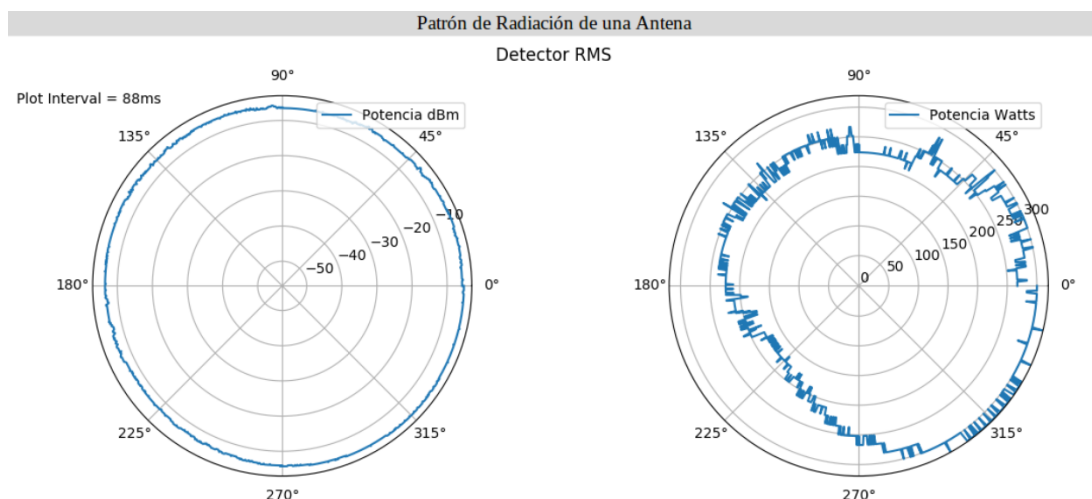


Figura B.15: Patrón de radiación de un Dipolo a 1090 MHz, uso del RMS y sin etapa de filtrado digital

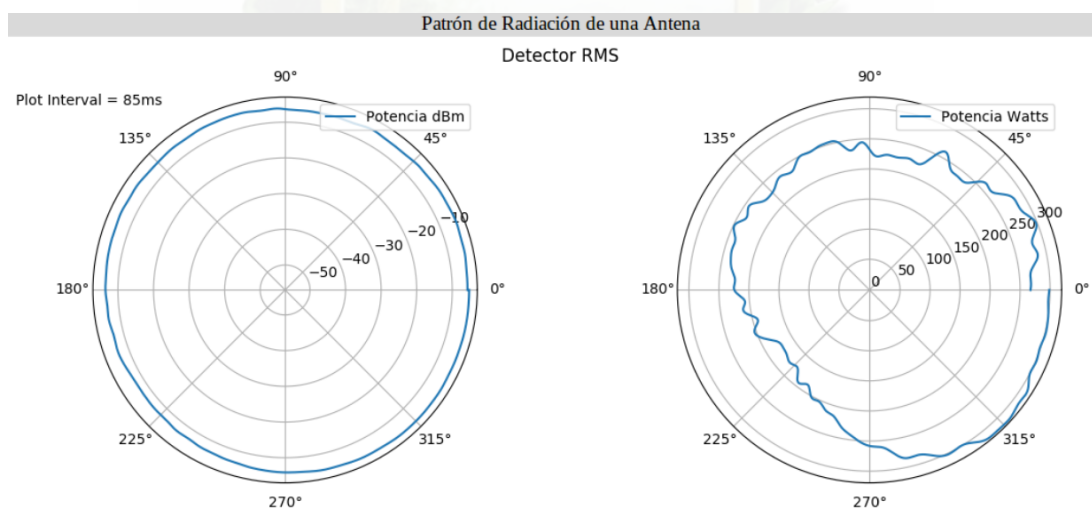


Figura B.16: Patrón de radiación de un Dipolo a 1090 MHz, uso del RMS y con etapa de filtrado digital

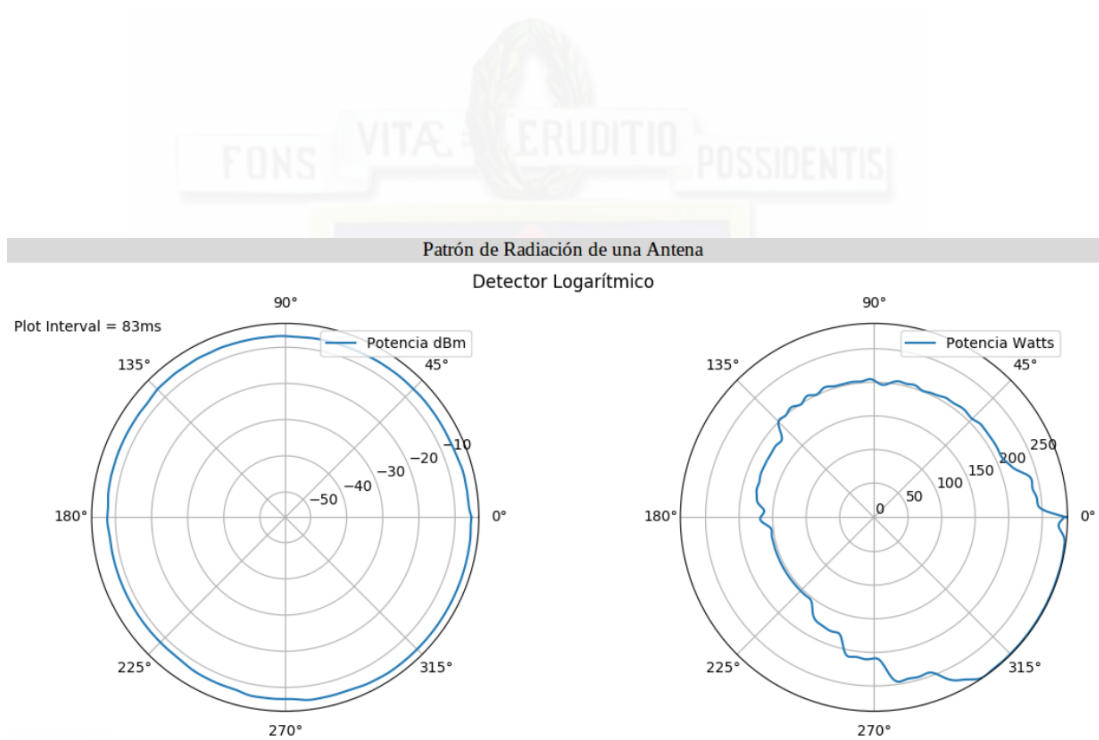


Figura B.17: Patrón de radiación de un Dipolo a 1090 MHz, uso del LOG y con etapa de filtrado digital

B.2.4. Pruebas en la Antena Girasol

En esta prueba es realizada a una frecuencia de 2800 MHz con uso del filtro RF sintonizado a esta frecuencia y se hace uso de detector RMS y del detector LOG.

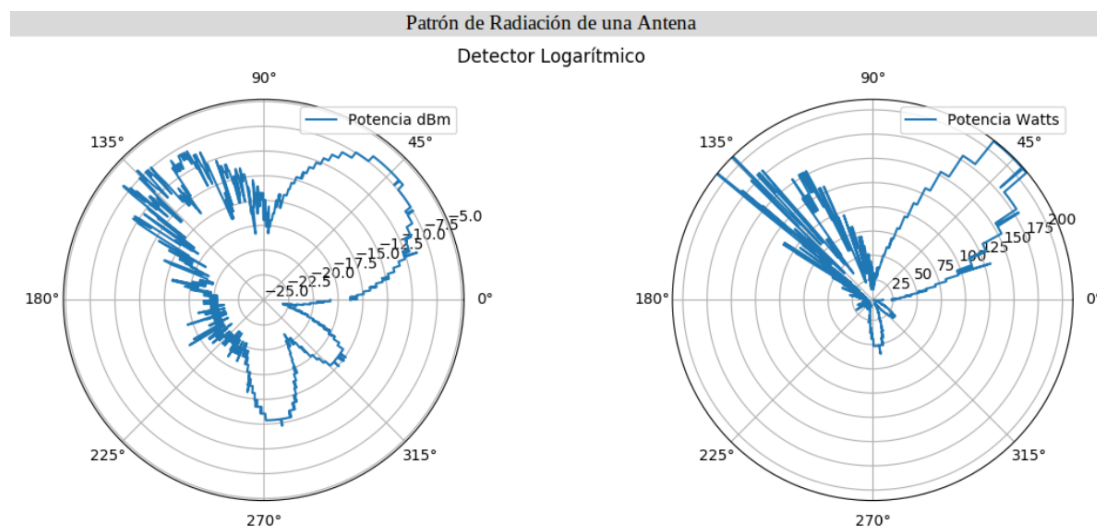


Figura B.18: Patrón de radiación de una Girasol a 2800 MHz Horizontal, uso del LOG y sin etapa de filtrado digital

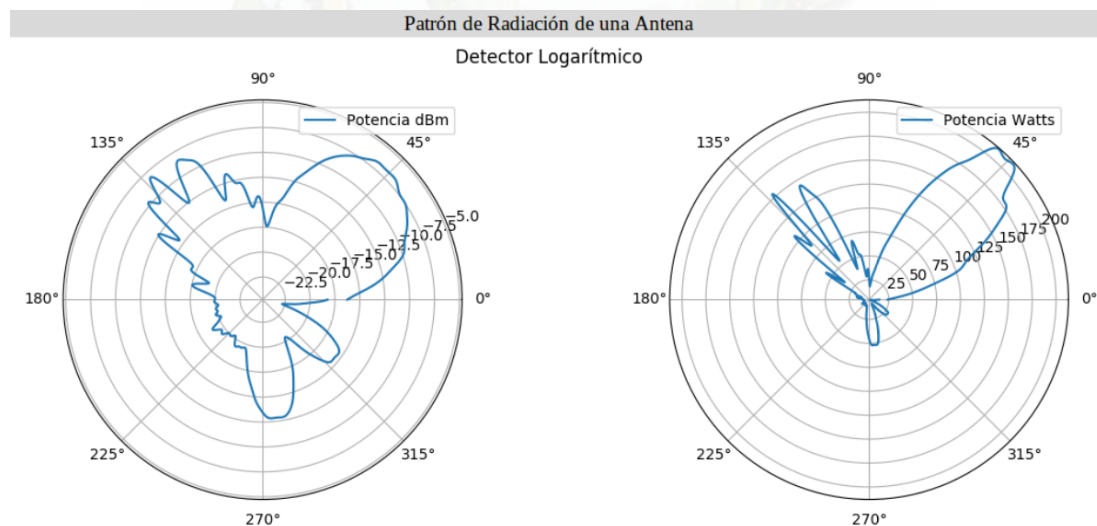


Figura B.19: Patrón de radiación de una Girasol a 2800 MHz Horizontal, uso del LOG y con etapa de filtrado digital

B.2.5. Resultados y mediciones erróneas

En los resultados que se obtienen en la banda de las frecuencias de hasta 2800 MHz se pueden capturar lóbulos pequeños, menores o secundarios como es en el caso de las antenas Vivaldi y Logarítmica de las cuales se pueden diferenciar claramente y presentan en menor potencia dichos lóbulos, para obtener una precisión aun mejor de las mediciones deben estar en un ambiente fuera de ruido, como dentro de una cámara anecoica.

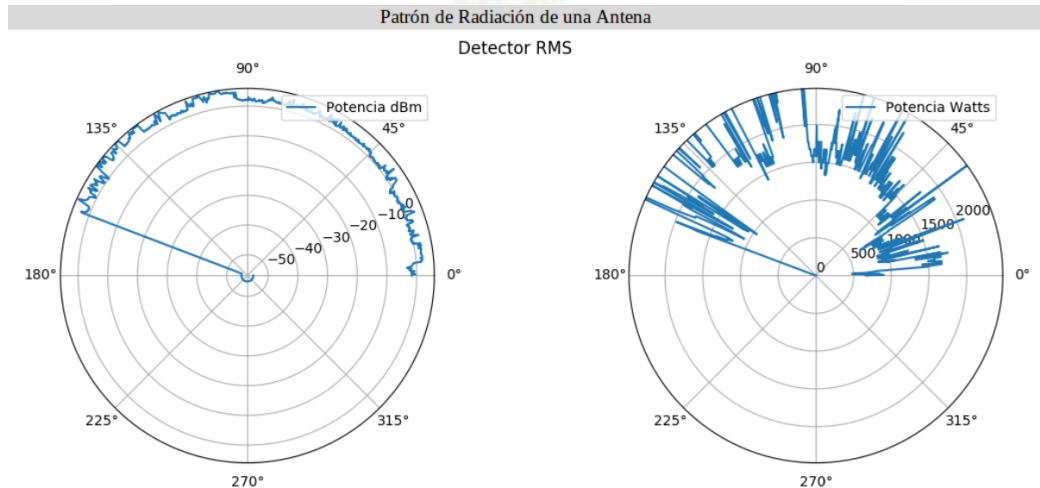


Figura B.20: Patrón de radiación defectuoso

Cuando se realizan pruebas podría presentarse el siguiente caso ver figura B.20, en donde hay variaciones abruptas de la potencia o no detecte nada de potencia en cualesquier detector que se implemente estos casos pueden ser mitigados por las siguientes recomendaciones:

- Asegurar una conexión firme de la Antena Transmisora y Receptora
- Asegurarse de conectar adecuadamente y firmemente los cable en los conectores SMA y los conectores tipo N, tanto en el lado del transmisor como en el lado del receptor
- Utilizar la cubierta o jaula de Faraday para anular el efecto de los campos externos
- Asegurarse que en el espectro de frecuencias del NI-PXI o HP 8593E a la frecuencia de prueba o aledañas no exista interferencias
- Que el filtro no esté suelto dentro de la cubierta
- La distancia de separación entre antenas que no este demasiado cerca ni alejadas demasiado
- Definir adecuadamente la frecuencia de transmisión en donde opere la antenna receptora
- Encender el interruptor rojo en la parte superior del lado de recepción y verificar si los módulos bluetooth están emparejados
- Reemplazar batería o el nivel de las baterías son bajos (recargar)

La figura B.21 nos indica algunos tipos de diagramas de radiación y con este modelo podemos clasificar a las antenas según su patrón de radiación ver Tabla B.1.

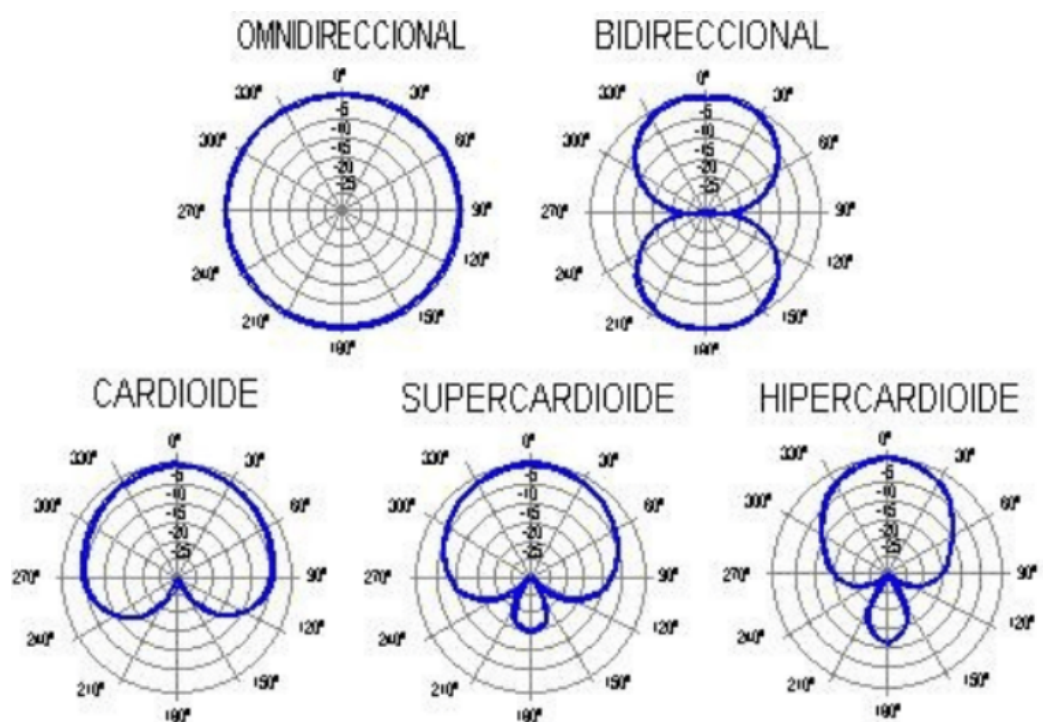


Figura B.21: Diagramas de directividad [28]



Frecuencia	Tipo de Antena	Clasificación
1090 MHz	Dipolo	Omnidireccional
1090 MHz	Vivaldi	Cardioide
1770 MHz	Microstrip Grande	Cardioide
1770 MHz	Vivaldi	Cardioide
1850 MHz	Trébol	Supercardioide
1850 MHz	Vivaldi	Cardioide
2270 MHz	Vivaldi	Hipercardioide
2270 MHz	Logarítmica	Bidireccional
2400 MHz	Microstrip Pequeña	Cardioide
2400 MHz	Divisor de Potencia	Directiva
2400 MHz	Logarítmica	Directiva
2800 MHz	Girasol	Directiva
2800 MHz	Vivaldi	Bidireccional
2800 MHz	Logarítmica	Bidireccional

Tabla B.1: Resultados de tipos de directividad en las antenas de estudio



Apéndice C

Guía del usuario del Detector

Se presenta la guía del usuario de la placa detector RF de Analog Devices.

Se presenta la guía del usuario ver figura C.1 así como de las conexiones de cada detector.

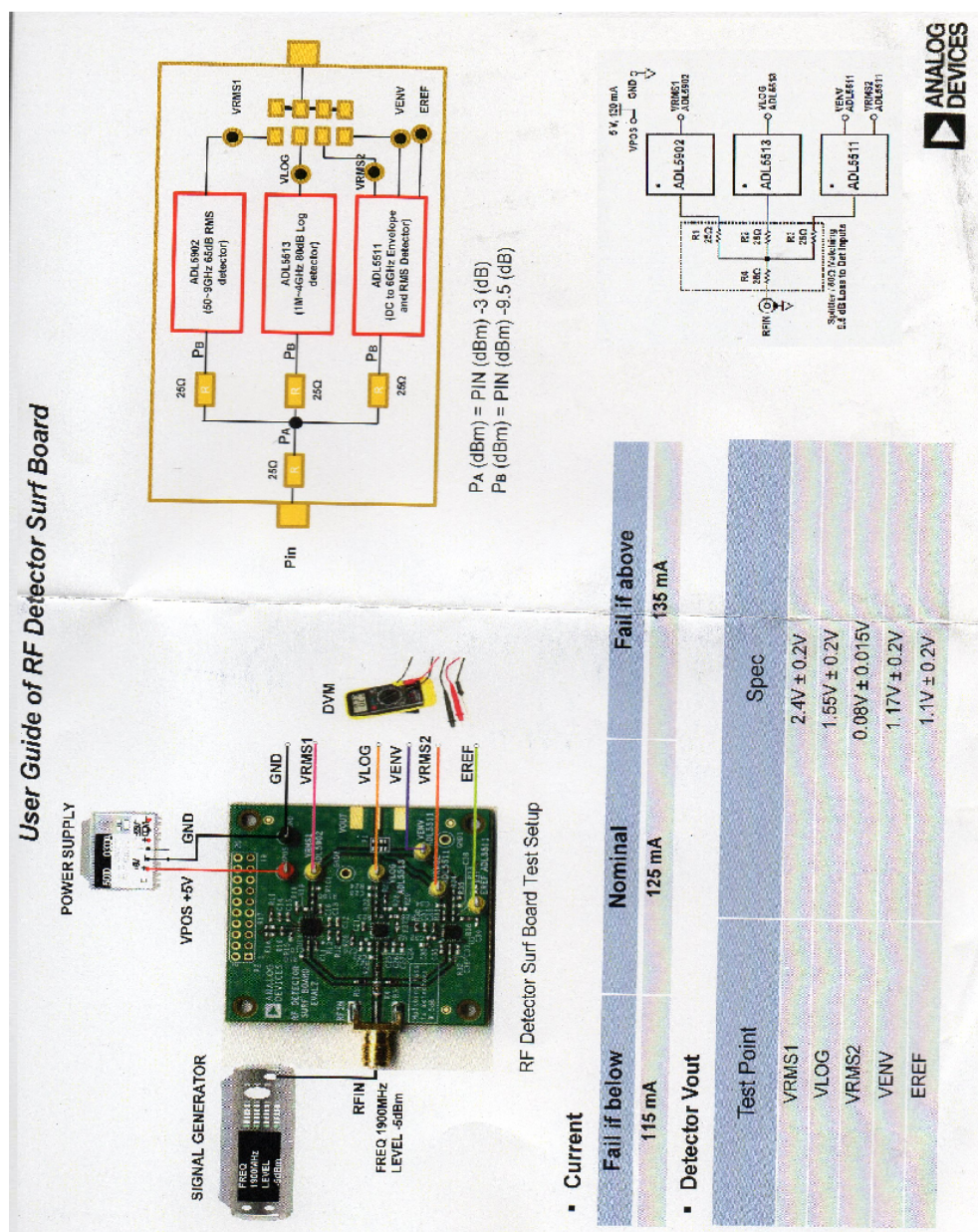


Figura C.1: Guía del usuario del detector RF



Apéndice D

Manual del Usuario

En este documento se presenta el manual de usuario del equipo desarrollado donde se detallan los componentes del sistema y la interfaz gráfica. También se explicará de manera detallada paso a paso como se debe ocupar el equipo y el programa, los usos y recomendaciones.

D.1. Componentes del Sistema

El sistema consta de una parte física y de una interfaz gráfica. A continuación se detallará la parte física del sistema.

D.1.1. Componentes Físicos

La parte física del sistema consta de los siguientes componentes:

- Torre de Soporte de antena transmisora
- Torre de Soporte de antena de prueba
- Fuente de Alimentación de 9v
- Conector USB macho a macho
- Cubierta protectora de interferencia

Todos los componentes se presentan en la figura [D.1](#). Para la utilización del equipo es necesario contar con un generador de señales de RF, filtro centrado en la frecuencia de prueba, la antena de prueba, y conectores que no se incluyen con el equipo.

D.1.1.1. Torre de Soporte de Antena Transmisora

La figura [D.2](#) muestra la Torre de Soporte para la antena transmisora que está compuesta por 7 elementos.

Los elementos 1, 2 y 3 corresponden a conectores SMA, los cuales se muestran en la figura [D.3](#). El conector 1 y 2 van enlazados mediante el conector 3. El conector 1 se utiliza para conectar la antena transmisora mientras que al conector 3 se conecta el generador de señales RF. El elemento 4 es un soporte que mantiene los conectores sujetos al eje (5). El elemento 6 es el eje principal de la torre. El elemento 7 es la base de la torre.

D.1.1.2. Torre de Soporte de Antena de Prueba (Receptora)

La Torre de Soporte de la antena de prueba (figura [D.4](#)) consta de 3 partes principales.

1. **Parte A:** La parte A consta de 3 conectores (Macho Tipo N-SMA, hembra Tipo N-SMA y UHF hembra-hembra) igual que la torre de transmisión. Estos conectores están sujetos mediante un soporte. Hay un segundo soporte que une el eje principal de la torre con todos los conectores.
2. **Parte B:** La parte B esta cubierta por el protector de interferencia. Si se retira este protector se podrá observar un soporte de forma circular que contiene componentes en su parte superior e inferior. Los componentes de la parte superior se muestran en la figura



Figura D.1: Componentes Físicos del Sistema



Figura D.2: Torre de Soporte para la antena transmisora

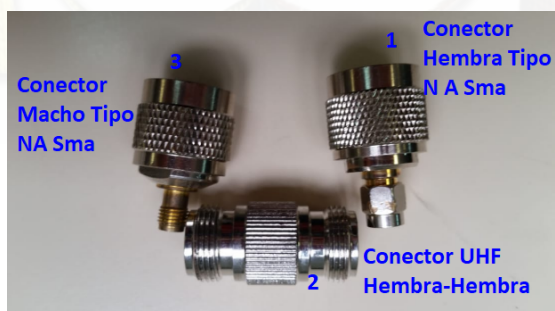


Figura D.3: Conectores de la Torre Transmisora



Figura D.4: Torre de Soporte de Antena Receptora



Figura D.5: Parte A de la torre

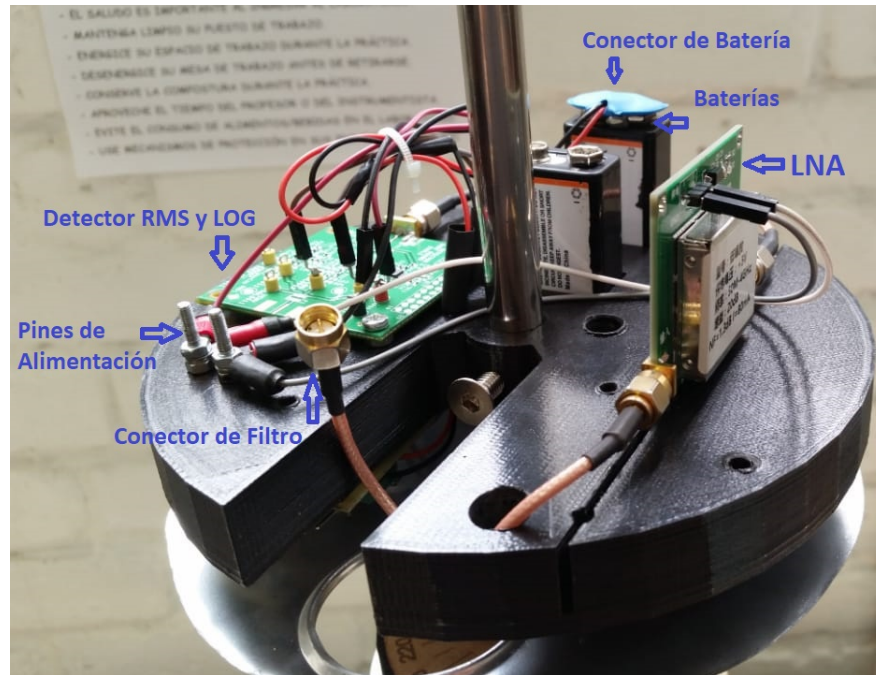


Figura D.6: Componentes de la parte Superior

D.6.

Los componente en la parte superior son:

- LNA
- Detector RMS y LOG
- Baterías
- Conector para el filtro de RF
- Conector de baterías
- Pines de alimentación

Solo una batería estará conectada y la otra se utilizará en caso de que se agote la una. A la entrada del LNA se encuentra un cable conectado en cuyo otro extremo deberá ser conectado un filtro de RF. Los pines de alimentación son de 5V, el rojo especifica el positivo y el negro el negativo. Estos pines alimentan al detector como al LNA. El detector RMS y LOG está sujeto con tornillos y no deberá moverse ya que este se encuentra calibrado.

Solo en caso de ser necesario y si se desea utilizar otro LNA, se deberá retirar los pines de alimentación de este, desconectar el conector de entrada y de salida y retirarlo de su ranura. Posteriormente coloque en la ranura otro LNA, conecte los cables de entrada

y salida del LNA y alimente correctamente el LNA mediante los pines positivo y negativo.

Los componentes que se encuentran en la parte inferior se presentan en la figura D.7.

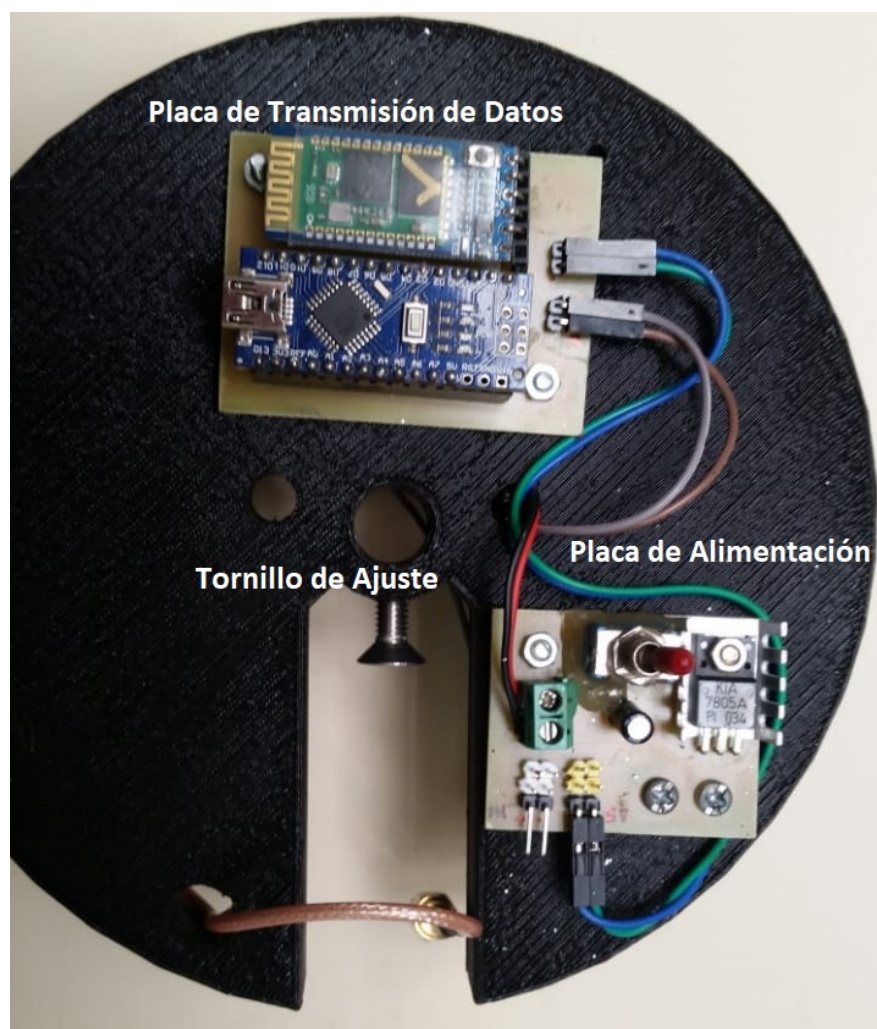


Figura D.7: Componentes de la parte Inferior

Estos componentes no son desmontables y por esta razón se encuentran en la parte de abajo. Se puede observar que la parte inferior cuenta con dos placas electrónicas. La primera se encarga de la transmisión de datos y consta de un Arduino Nano y un módulo bluetooth. La segunda placa es una fuente de alimentación regulada y alimenta a todos los componentes necesarios del sistema. También se tiene un tornillo de ajuste que sirve para fijar el disco al eje principal de la torre.

La placa de alimentación cuenta con pines de color blanco que corresponden a salidas de voltaje de alimentación. Como en este caso las baterías son de 9 voltios los pines tendrán ese voltaje. Se ha colocado estos pines por si es necesario alimentar algún LNA con mayor voltaje, en cuyo caso se deberá conectar cables a estos pines y pasarlos a la parte superior por algunos de los agujeros que incorpora el disco de soporte.

3. Parte C

La parte C tiene componentes internos, algunos conectores y un pulsante en su parte externa. Se presenta en la figura D.8 la parte externa.

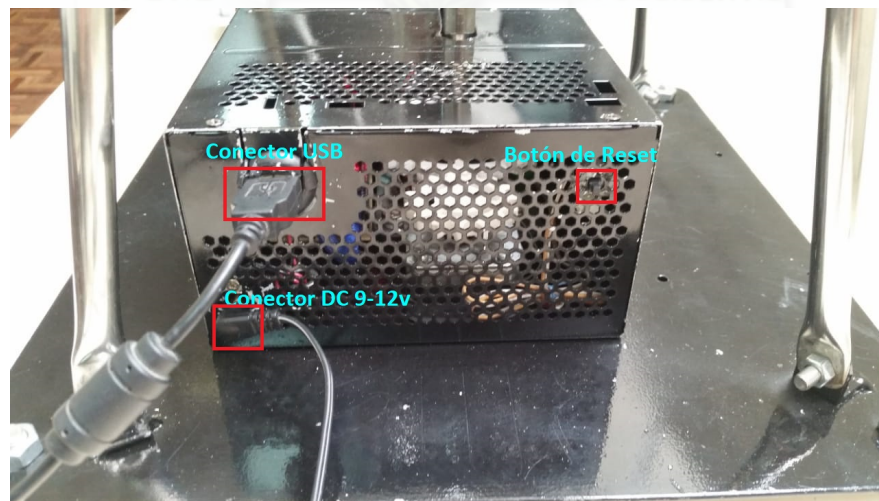


Figura D.8: Parte C (Externa)

La parte externa cuenta con el conector USB hembra que sirve para conectarse con la interfaz gráfica en la PC. El Conector DC acepta un voltaje entre 9 y 12 voltios que sirve para alimentar al motor paso a paso que se encuentra en el interior. El botón de reset permite resetear el sistema físico.

La parte interna (figura D.9) cuenta con un motor de paso a paso que permite rotar el eje principal de la torre mediante engranes que se encuentran ubicados en el propio motor como en el eje principal. También cuenta con una placa principal que permite tanto la comunicación con la PC mediante comunicación serial como la comunicación con la parte B mediante un módulo bluetooth.

Otro elemento de la parte C es un detector de línea negra, que sirve para colocar el motor en la posición inicial.

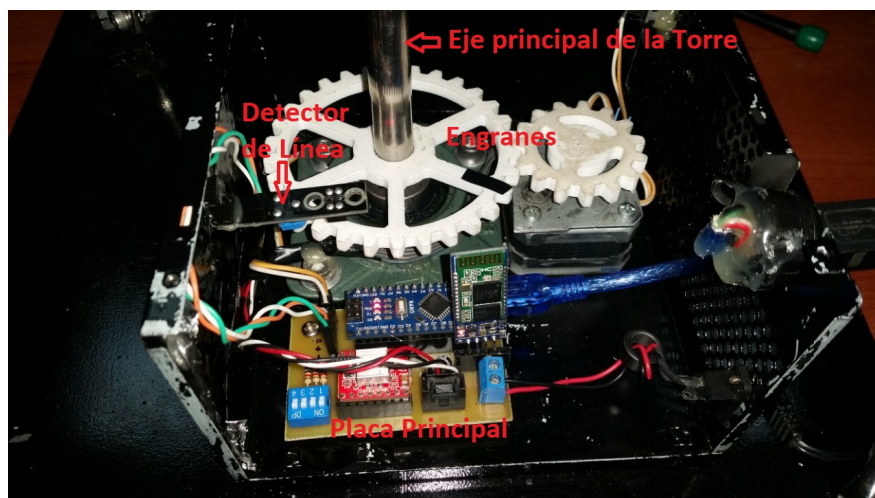


Figura D.9: Parte C (Interna)

D.1.1.3. Cubierta Protectora

La cubierta protectora sirve para evitar la interferencia del ambiente exterior en alguna medición que se este realizando ya que actúa como una jaula de Faraday. Esta cubierta va colocada en la parte B de la torre de recepción.

D.1.1.4. Fuente de 9v y conector USB

Estos son componentes incluidos. La fuente es de 9 voltios aunque se admite una fuente de hasta 12v. El conector USB debe ser macho a macho.

D.1.2. Puesta en Marcha del Equipo

En esta sección se detallará todas las configuraciones que se deben hacer para realizar una medición correcta.

D.1.2.1. Configuración del Generador de señales RF

Se puede utilizar cualquier tipo de generador de señales RF. Para esta demostración se utilizará el PXI como un generador de señales, el cual ha sido configurado a una frecuencia de 2.4 Ghz como ejemplo. También se ha utilizado el receptor de señales RF del PXI, el cual se ha centrado en la frecuencia de prueba. Mediante una antena de prueba conectada a la entrada del "osciloscopio" se procede a comprobar el funcionamiento del generador. La potencia máxima que se ha configurado ha sido 5dBm.

D.1.2.2. Configuración de la Transmisión

De la salida del generador de señales se conecta un cable directamente al conector de entrada de la torre transmisora. En la figura D.10 (a) se muestra el cable conectado a la salida del generador de señales, y en la D.10 (b) se muestra el cable conectado en el conector de la torre de transmisión.



a)



b)

Figura D.10: Conexión de (a) Generador de Señales (b) Entrada del conector de la torre transmisora

Finalmente, en el otro extremo del conector de la torre de transmisión se coloca la antena transmisora. Las conexiones completas para la parte de transmisión se presentan en la figura D.11.

D.1.2.3. Configuración de la Torre de Recepción

La Torre de recepción cuenta con componentes en la parte superior y en la parte inferior. La parte superior cuenta con algunos elementos que son desmontables del eje principal. Es necesario



Figura D.11: Conexión Final de la Transmisión

quitar estos elementos para el caso de:

- Cambiar las baterías
- Colocar un filtro de RF diferente
- Colorar un diferente LNA

Todos los componentes que no son intercambiables están atornillados y no es necesario ninguna configuración adicional. Los componentes que se pueden intercambiar están sujetos mediante ranuras y se los puede retirar fácilmente si se los desconecta.

A continuación, como ejemplo se realizará una demostración donde se cambiará el filtro de RF y se colocarán nuevas baterías. Este paso también sirve para configurar una nueva medición de patrón de una antena en particular.

La parte superior de esta torre se muestra en la figura [D.12](#):

Para retirar la cubierta siga los siguientes pasos:

1. Desconecte la antena
2. Desconecte el conector
3. Retire el soporte A del eje principal deslizándolo hacia arriba
4. Retire la cubierta de metal del eje principal deslizándola hacia arriba

Una vez retirada la cubierta de metal se verá el soporte en forma circular como se presentó en la figura [D.6](#). Además colocados en el eje estarán dos soportes. Un soporte mantendrá fijo el filtro RF a utilizarse, mientras que el otro soporte contendrá la cubierta de metal. A continuación se detalla el procedimiento de la colocación de un filtro de RF y de la colocación de las baterías.

1. Colocación del Filtro

- Coloque el filtro de RF en el soporte (es necesario hacer presión).
- Posteriormente conecte el conector al filtro.
- Baje el filtro de tal manera que una porción de el quede en la ranura del soporte circular.
- Finalmente baje el soporte de la cubierta de tal manera que quede a la misma altura que el conector de entrada del filtro.

El resultado de estos procedimientos se muestra en la figura [D.13](#).

2. Colocación de las Baterías

En el soporte circular hay dos ranuras para baterías, aunque solo se utiliza una batería y la otra es de reserva. En este paso solo se coloca la batería en la ranura y se conecta el conector de batería ([D.14](#)).

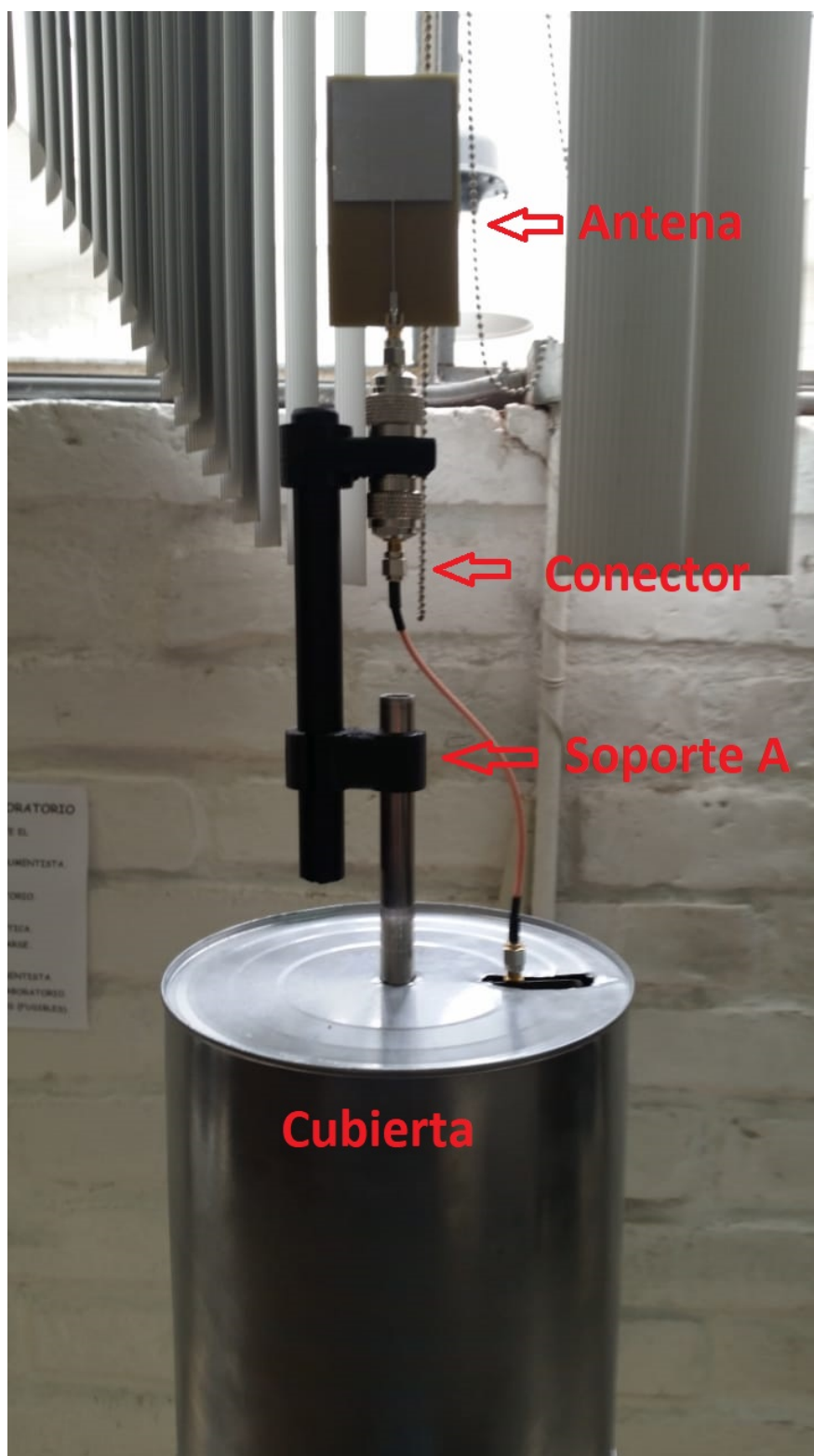


Figura D.12: Parte Superior de la Torre de Recepción

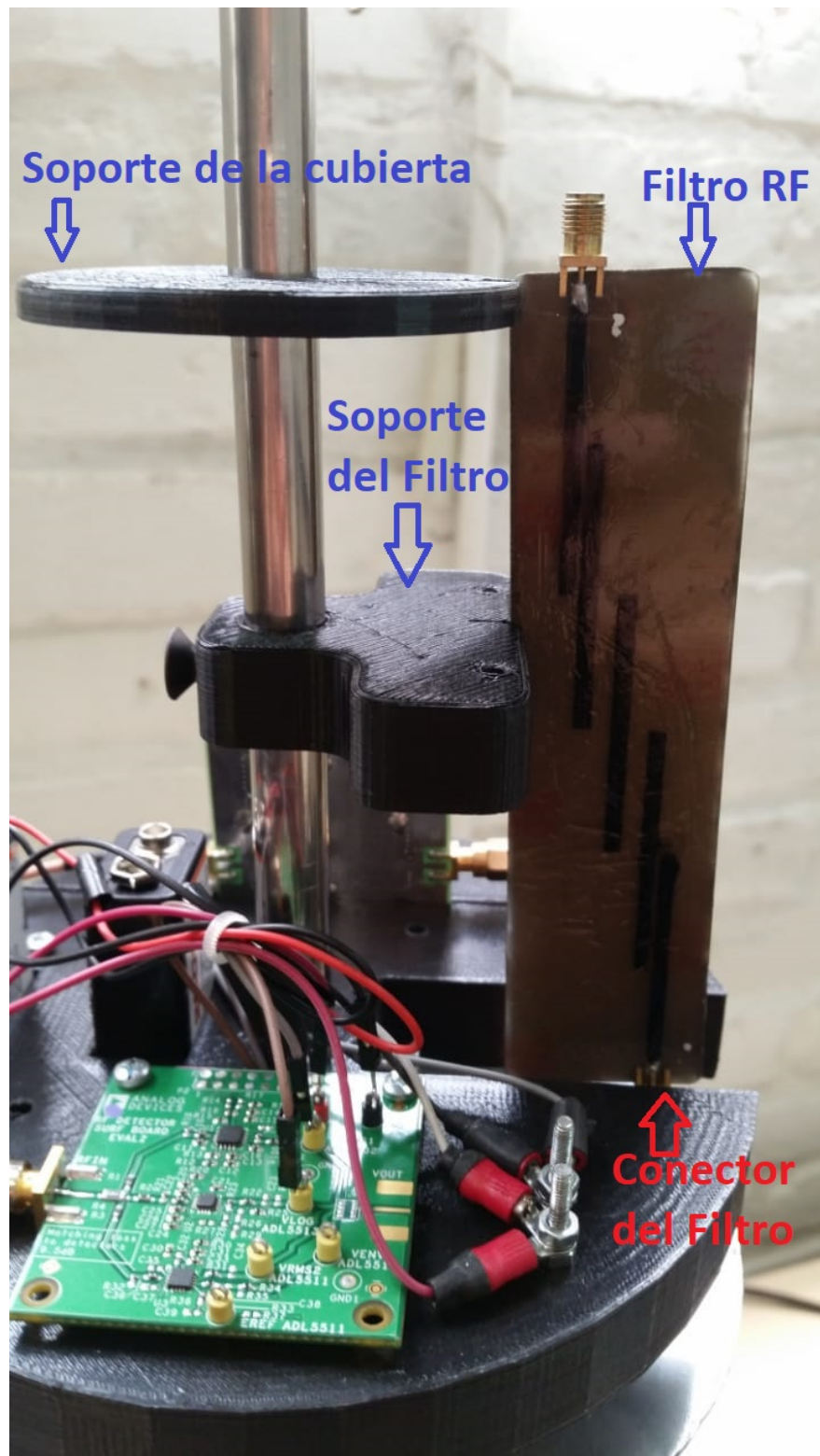


Figura D.13: Colocación del Filtro

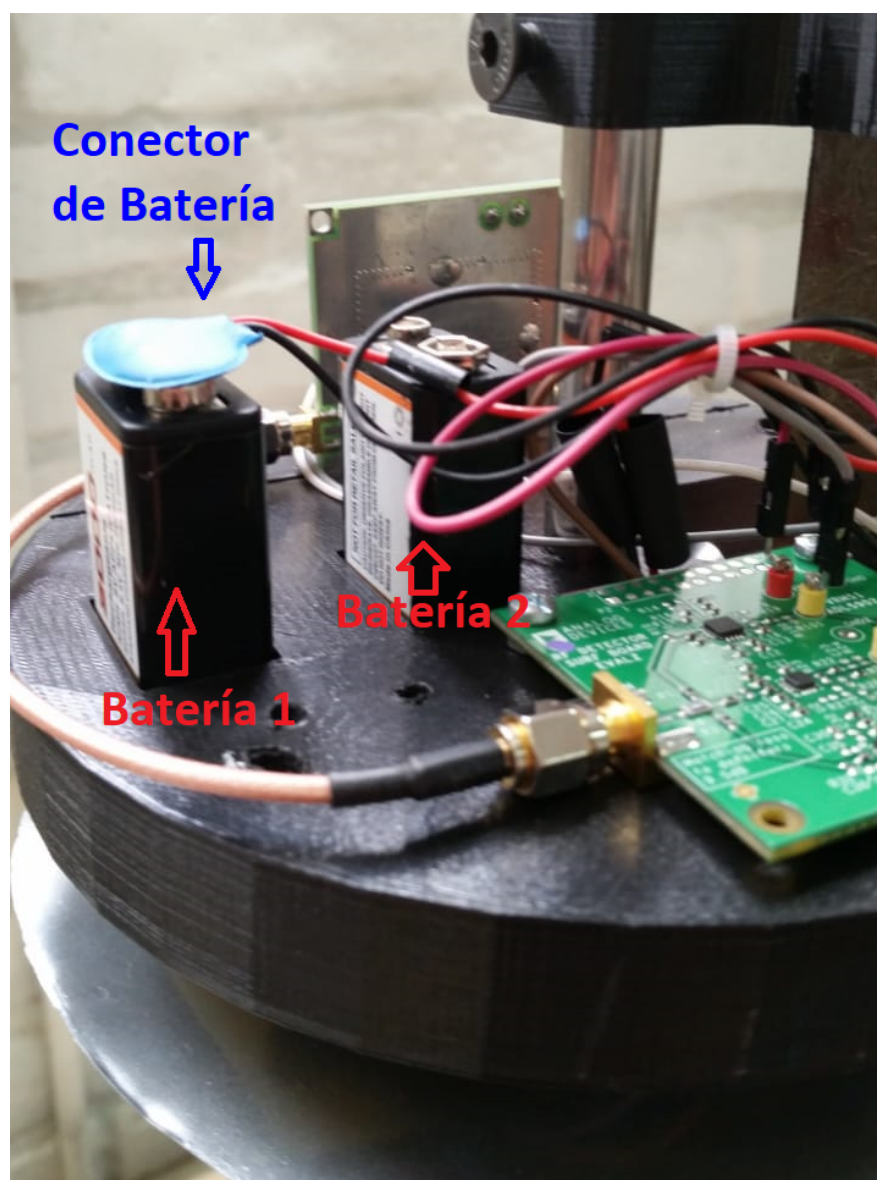


Figura D.14: Colocación de Baterías



3. Colocación de la Cubierta y Antena

Refiérase a la figura [D.12](#).

- Conecte un cable a la entrada del filtro de RF.
- Refiriéndose a la figura [D.12](#), saque el extremo libre del cable conectado al filtro por la ranura que tiene la cubierta.
- Vuelva a colocar la cubierta. Para lograrlo introduzca la cubierta por el eje principal y deslícelo hasta el fondo de tal manera que cubra todos los componentes del soporte circular.
- Coloque el soporte A en el eje y deslícelo hacia abajo.
- Conecte el otro extremo del cable de la entrada del filtro en el conector N A Sma macho.
- Conecte la antena de prueba en el conector N-SMA hembra.

El resultado deberá verse como en la figura [D.12](#).

D.1.2.4. Encendido de la Torre de Recepción

Una vez colocados todos los componente se debe encender el equipo.

- Ubíquese en la parte inferior de la cubierta metálica. Deberá observar un switch de color rojo, el cual es el interruptor de encendido/apagado de la parte superior del sistema.
- Encienda el equipo activando el switch.
- Coloque bien la cubierta metálica si en caso aún no lo esta. Esta deberá quedar como se muestra en la figura [D.15](#).

El resultado de estos procedimientos se pueden observar en la figura [D.15](#)

Finalmente, conecte la fuente de alimentación al conector de 9-12 voltios de la parte C de la torre. Conecte el conector USB al equipo y a su PC. El resultado deberá verse como en la figura [D.16](#).

D.1.2.5. Resultado Final de la puesta en marcha del Equipo

El resultado final de la puesta en marcha del equipo se muestra en la figura [D.17](#).

La separación adecuada se debe calcular mediante la ecuación [D.1](#):

$$Distancia_mínima = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (D.1)$$

Donde:

- **D:** Altura de la antena transmisora
- **λ :** Longitud de Onda

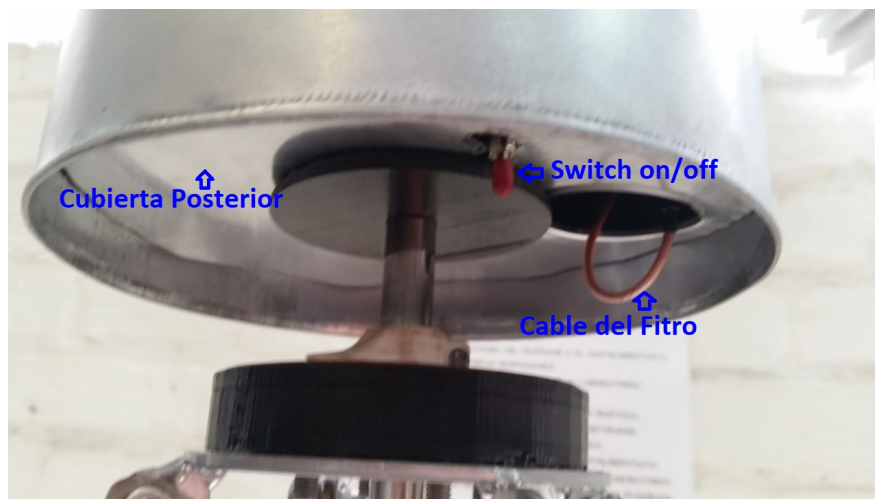


Figura D.15: Encendido de la Torre de Recepción

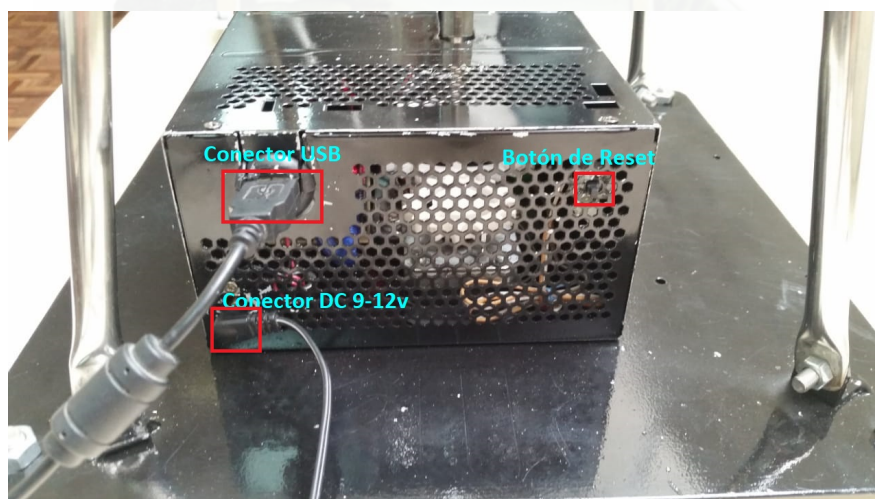


Figura D.16: Conexión con la PC y alimentación de la parte inferior



Figura D.17: Resultado Final



La Distancia mínima corresponde a la distancia donde empieza la región de campo lejano o zona de Fraunhofer, donde el patrón de radiación de una antena está ya definido.

El cálculo de esta distancia para una antena de 10 cmts de altura y para una frecuencia de 2.4 GHz es de 16 cmts. La distancia se debe medir desde el filo de la antena transmisora hasta el filo de la antena de prueba. En este ejemplo se ha configurado esta distancia en 17 cmts.

D.2. Uso de la Interfaz Gráfica de Usuario

La interfaz gráfica fue desarrollada mediante el lenguaje de programación Python. Es necesario instalar todas las librerías necesarias para que el programa pueda correr sin generar errores. El programa corre en la versión de Python 3.x, por ende se debe tener instalado Python en su sistema operativo de preferencia Linux o Windows. Otro requerimiento necesario es tener instalado PIP3 que es una utilidad de línea de comando para instalar librerías. Posteriormente con el uso del comando PIP3 ejecutar:

- pip3 install serial
- pip3 install pandas
- pip3 install matplotlib
- pip3 install threading
- pip3 install numpy
- pip3 install tkinter
- pip3 install csv
- pip3 install collections
- pip3 install struct
- pip3 install scipy

La interfaz se muestra en la figura [D.18](#).

Como se observa en la figura [D.18](#), la interfaz consta de dos gráficas en coordenadas polares. La gráfica izquierda mostrará el patrón de radiación de la antena en dBm (decibelio-milivatio) mientras que la gráfica de la derecha mostrará el patrón en uW (micro vatios).

También en la parte inferior de la interfaz se encuentran las funciones implementadas. Estas funciones son 4 y se describen a continuación, así como los pasos a seguir para obtener el patrón de radiación de la antena de prueba.

D.2.1. Conexión

Esta función permite la conexión serial con el equipo físico. Para una correcta conexión se deberá elegir el puerto de la PC al que se haya conectado el equipo (/dev/tty/USB para linux y COM para Windows). Posteriormente se deberá pulsar el botón Conectar". En caso de una

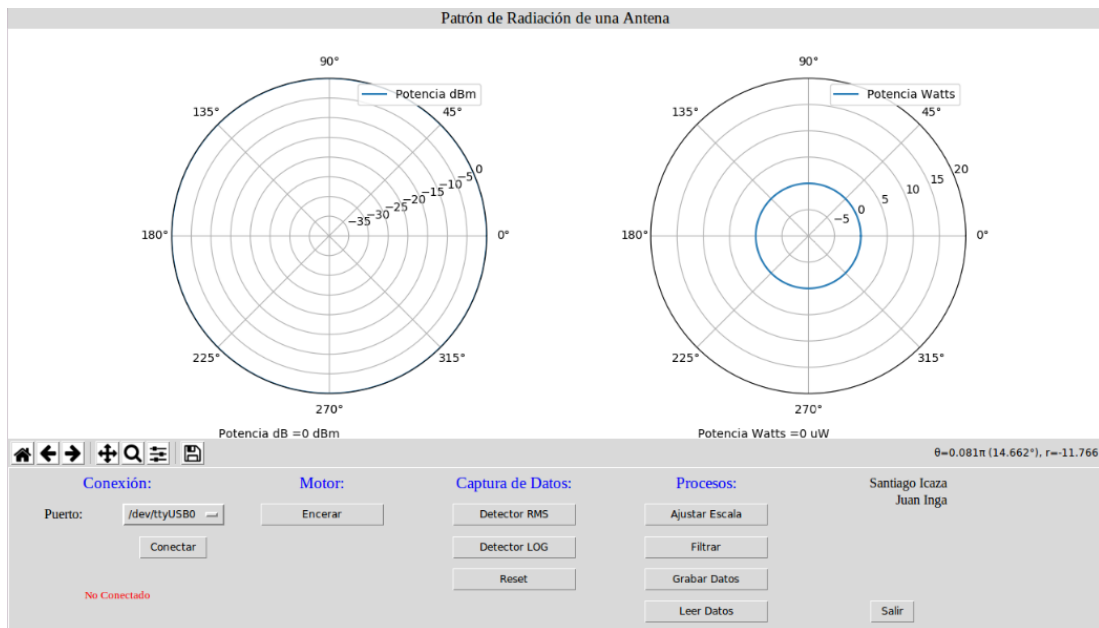


Figura D.18: Interfaz gráfica de Usuario

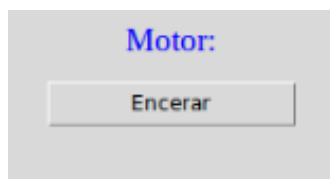
conexión satisfactoria, el label de color rojo "No Conectado"(figura D.19 a)deberá cambiar al color verde y con la leyenda de Conectado"(figura D.19 b).



Figura D.19: Conexión de la PC con el Equipo. (a) No conectado (b) Conectado

D.2.2. Motor

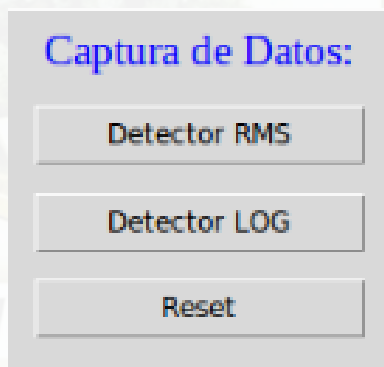
La siguiente función lleva el nombre de *Motor* (figura D.20). En esta función solo hay un botón llamado *Encerar* el cual pone en la posición de inicio (0 grados) al motor. Antes de comenzar cualquier medición del patrón de alguna antena se debe pulsar este botón.

Figura D.20: Función *Motor*

D.2.3. Captura de Datos

La figura D.21 muestra los procesos de esta función. Se tiene tres botones.

- **Detector RMS:** Este botón permite la captura del patrón de radiación utilizando el detector RMS.
- **Detector LOG:** Este botón permite la captura del patrón de radiación utilizando el detector LOG.
- **Reset:** En caso de algún problema con la captura de datos, este botón detiene todo el proceso. Si se desea realizar una nueva medición se deberá pulsar de nuevo el botón *Encerar* de la función *Motor*

Figura D.21: Función *Captura de Datos*

La elección entre uno u otro detector depende del usuario. El detector RMS tiene mayor resolución, pero su sensibilidad solo alcanza hasta los 5 dBm. En cambio, el detector LOG tiene menor resolución pero su sensibilidad alcanza los 19 dBm. En nuestra experiencia, el detector LOG siempre obtiene mejores resultados (menor interferencia en las medidas) que el detector RMS para frecuencias mayores que 2 GHz y el detector RMS para menores que 2 GHz.

Al pulsar los botones *Detector RMS* ó *Detector LOG* el motor del equipo comenzará a girar. El equipo enviará los datos de la captura a la PC. Mediante el programa en Python se empezará a graficar los datos en escala logarítmica y adimensional. El proceso de captura dura aproximadamente 55 segundos, cuando el motor haya girado 360 grados.

Continuando con el ejemplo de la obtención del patrón de radiación de la antena microstrip de 2.4 GHz, los patrones obtenidos utilizando el detector RMS se presentan en la figura D.22.

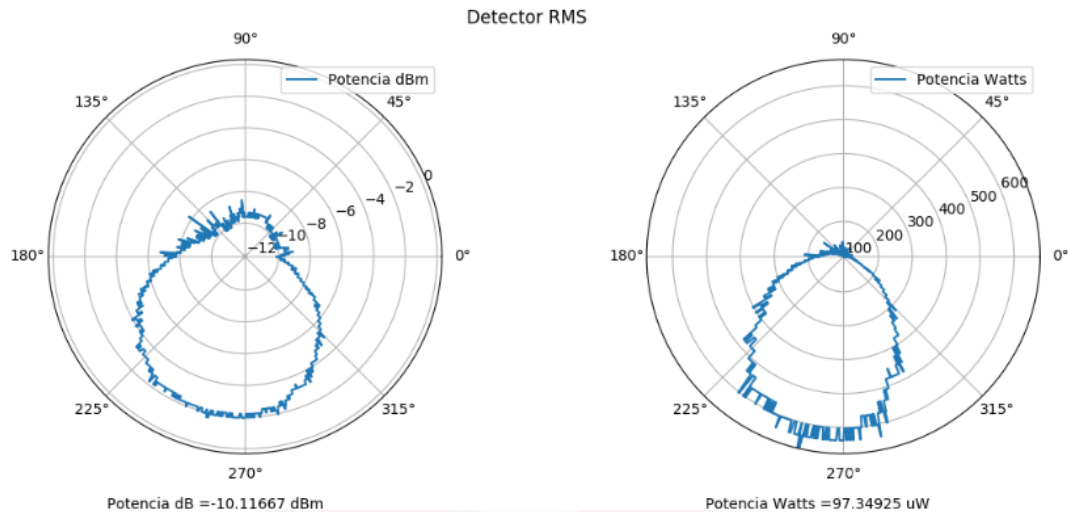


Figura D.22: Patrón de Radiación obtenido para una Antena Microstrip de 2.4 GHz (Detector RMS)

El patrón obtenido mediante el detector logarítmico se presenta en la figura D.23

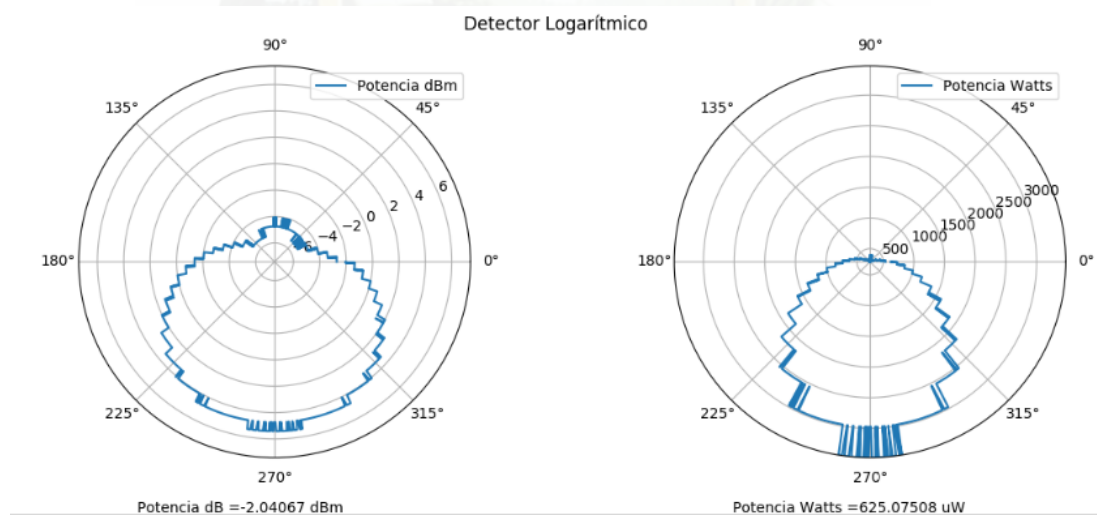


Figura D.23: Patrón de Radiación obtenido para una Antena Microstrip de 2.4 GHz (Detector LOG)

D.2.4. Procesos

La siguiente función *Funciones* contiene 5 botones con diferentes funcionalidades (figura D.24).

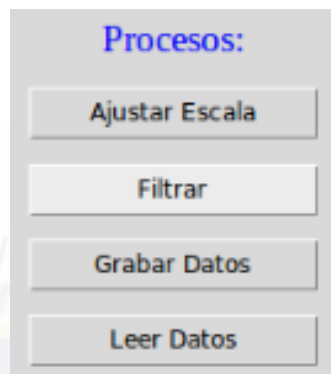


Figura D.24: Funciones de *Procesos*

- **Ajustar Escala:** Este botón permite ajustar la escala de ambas gráficas. Es necesario pulsar este botón reiteradas veces mientras se esta obteniendo la captura de datos.
- **Filtrar:** Realiza un filtrado de los datos obtenidos. Este botón solo deberá ser pulsado al final de la obtención del patrón de radiación caso contrario dañará el proceso de captura. El filtro utilizado es un filtro Butterworth. En la figura D.22 y D.23 se mostró el patrón obtenido sin filtrar para el detector RMS y LOG respectivamente. En la figura D.25 se muestra los respectivos patrones filtrados.
- **Grabar Datos:** Permite grabar los datos en un archivo de texto de alguna captura realizada, con el objetivo de que se pueda graficar utilizando cualquier otro programa o simplemente tener un registro de los datos.
- **Leer Datos:** Permite al usuario graficar algún registro de alguna captura realizada. Se deberá ingresar el archivo de texto que contengan los datos. El programa generará las gráficas correspondientes y las mostrará en la interfaz.

D.2.5. Funcionalidades Extra

La interfaz incorpora algunas funcionalidades extra que podrían ser útiles. Estas funcionalidades se muestran en la figura D.25.

- **Barra de Funcionalidades:** Esta barra contiene algunos botones útiles, en los que se encuentra por ejemplo un botón para guardar la captura en un formato de imagen png. Además contiene otros botones que permiten expandir la gráfica, acercar, entre otros.

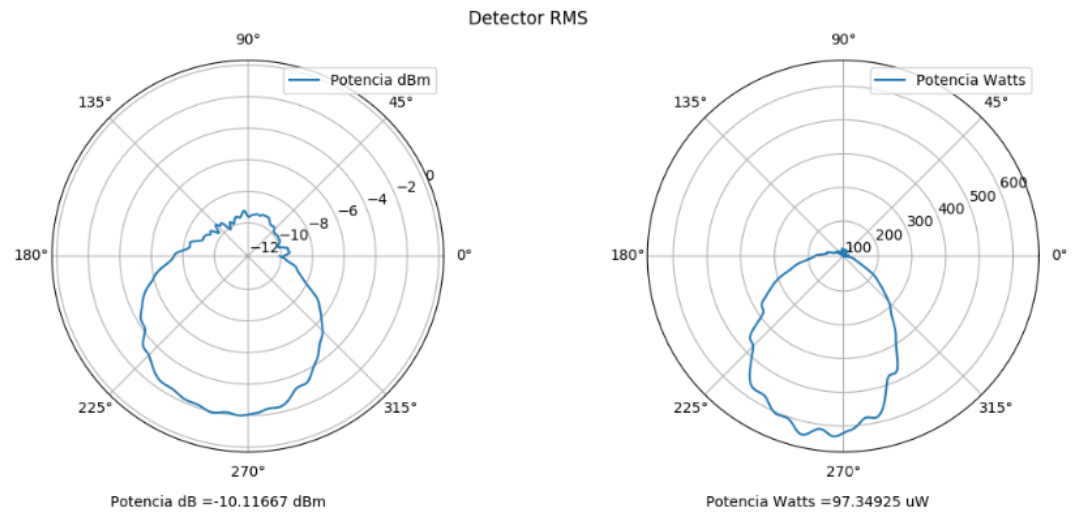
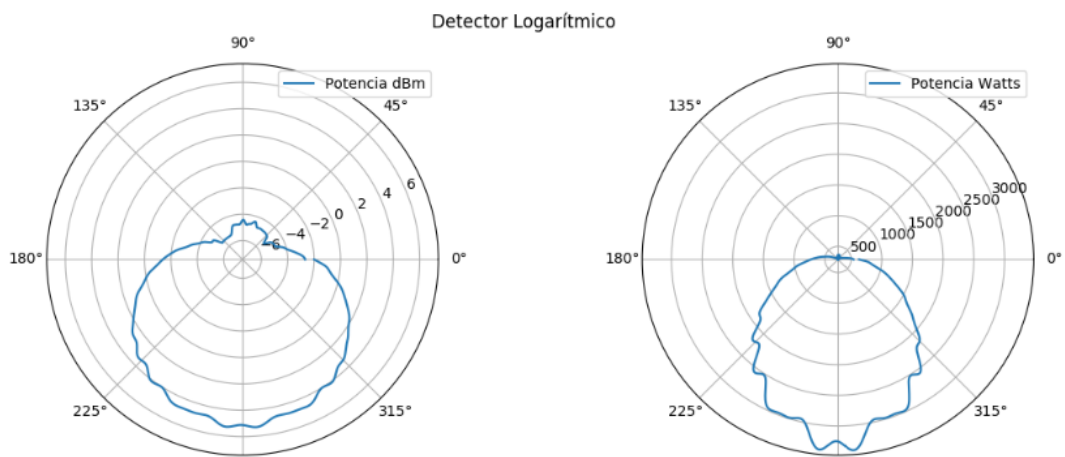
**a) Filtrado de los datos (Detector RMS)****b) Filtrado de los datos (Detector LOG)**

Figura D.25: Patrón de Radiación filtrado. a) Patrón filtrado del detector RMS b) Patrón filtrado del detector LOG

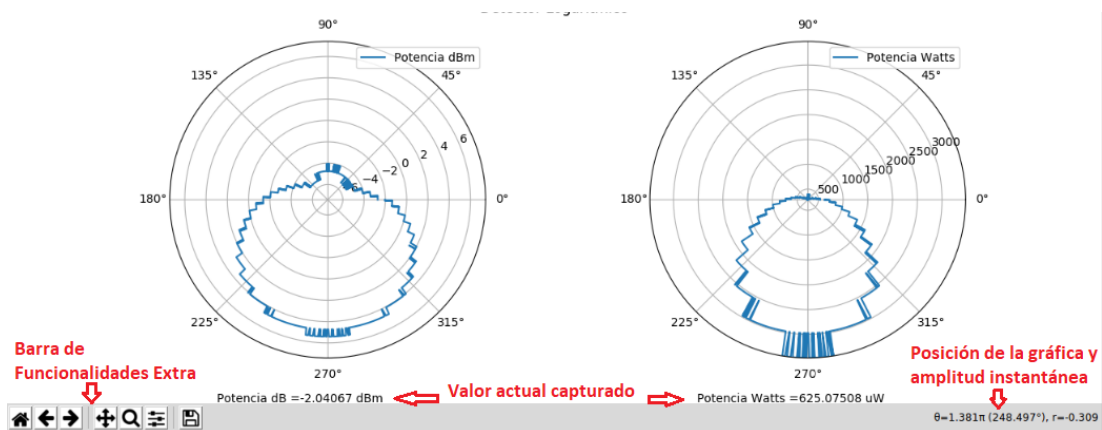


Figura D.26: Funcionalidades Extra

- **Label con el valor actual capturado:** Mientras se realiza la captura estos label muestran los valores de potencia recientes.
- **Posición de la gráfica y amplitud instantánea:** Si se coloca el mouse en cualquier posición de la gráfica, esta funcionalidad permitirá obtener el valor de ángulo y amplitud de la gráfica. Es útil para saber los máximos y mínimos de los patrones.

D.2.6. Salir

En la interfaz gráfica, en la parte inferior derecha hay un botón llamado *Salir* que cierra el programa.



Apéndice E

Código implementado en Python y en los Arduino Nano

Se presenta la programación realizada en Python y la programación utilizada en los Arduino Nano.

#Código Implementado en Python

```
import tkinter
import struct
from threading import Thread
from matplotlib.backends.backend_tkagg import (
    FigureCanvasTkAgg, NavigationToolbar2Tk)
from matplotlib.backend_bases import key_press_handler
from matplotlib.figure import Figure
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import matplotlib.animation as animation
from matplotlib.pylab import *
import collections
import serial
from scipy import signal
import csv
import pandas as pd
from tkinter import *
from tkinter import filedialog

class serialPlot:
    def __init__(self, serialBaud = 38400, plotLength = 100, dataNumBytes = 2):
        self.baud = serialBaud
        self.plotMaxLength = plotLength
        self.dataNumBytes = dataNumBytes
        self.rawData = bytearray(dataNumBytes)
        self.data1 = collections.deque([0] * plotLength, maxlen=plotLength)
        self.data2 = collections.deque([0] * plotLength, maxlen=plotLength)
        self.data3 = collections.deque([0] * plotLength, maxlen=plotLength)
        self.connected = False
        self.isRun = False
        self.isReceiving = False
        self.thread = None
        self.plotTimer = 0
        self.previousTimer = 0
        self.numPlot = 0
        self.changePlot = False
        self.dataB = 0
        self.dataWatts = 0
        self.csvData = []

    def connect2Port(self, serialPort):
        print('Trying to connect to: ' + str(serialPort) + ' at ' + str(self.baud) + ' BAUD.')
        try:
            self.serialConnection = serial.Serial(serialPort, self.baud, timeout=4)
            print('Connected to ' + str(serialPort) + ' at ' + str(self.baud) + ' BAUD.')
            self.connected = True
        except:
            print('Failed to connect with " + str(serialPort) + ' at ' + str(self.baud) + ' BAUD.')

    for i in range(self.plotMaxLength): #Rellenamos los datos del valor mínimo
        self.data3[i] = -55
    self.data1 = self.data3
```

```

def readSerialStart(self):
    if self.thread == None:
        self.thread = Thread(target=self.backgroundThread)
        self.thread.start()
        # Bloquea hasta que se empiecen a recibir datos
        while self.isReceiving != True:
            time.sleep(0.1)

def getSerialData(self, frame, lines1, lines2, lineValueText1, lineValueText2, lineLabel, timeText):
    global changePlot
    currentTimer = time.clock()
    self.plotTimer = int((currentTimer - self.previousTimer) * 1000)
    self.previousTimer = currentTimer
    theta = np.linspace(0, 2*np.pi, self.plotMaxLength)
    valWatts = str(self.dataWatts)
    valWatts = valWatts[valWatts.find('.')+6]
    valdB = str(self.datadB)
    valdB = valdB[valdB.find('.')+6]
    lines1.set_data(theta, self.data1)
    lines2.set_data(theta, self.data2)
    lineValueText1.set_text('Potencia dB = ' + str(valdB) + ' dBm')
    lineValueText2.set_text('Potencia Watts = ' + str(valWatts) + ' uW')

def backgroundThread(self):
    self.serialConnection.reset_input_buffer()
    self.serialConnection.flushInput()
    while (self.isRun):
        self.numPlot += 1
        if self.numPlot <= self.plotMaxLength:
            self.serialConnection.readinto(self.rawData) #Lee el dato del puerto.
            value, = struct.unpack('f', self.rawData)
            value = value*3.56/255
            if self.changePlot:
                self.datadB = -0.889*value*value+22.697*value-59.902;
            else:
                self.datadB = 48.519*value-87.679;
            try:
                self.dataWatts = (10**(self.datadB/10))*1000
            except:
                self.dataWatts = 0

            self.data1[self.numPlot-1] = self.datadB
            self.data2[self.numPlot-1] = self.dataWatts

            if self.numPlot == 2:
                self.data1[0] = self.data1[1]
                self.data2[0] = self.data2[1]

            self.newData = True #Se ha recibido un nuevo dato
            self.serialConnection.flushInput()
            self.serialConnection.reset_input_buffer()
            self.isReceiving = True
        else:
            self.isRun = False
    #self.thread.join()

```

```

self.thread = None
self.isReceiving = False
self.serialConnection.reset_input_buffer()
self.serialConnection.flushInput()
self.rawData = bytearray(b'\x00\x00\x00\x00')

def sendSerialData(self, data):
    self.serialConnection.write(data.encode('utf-8'))

def stopReceive(self):
    self.serialConnection.flushInput()
    self.rawData = bytearray(b'\x00\x00\x00\x00')
    self.isRun = False
    #self.thread.join()
    print('Stop receive data')
    self.thread = None

def close(self):
    self.isRun = False
    #self.thread.join()
    self.serialConnection.close()
    print('Disconnected...')

def _quit():
    if s.connected:
        s.close()
    root.quit() # stops mainloop
    root.destroy() # this is necessary on Windows to prevent
                   # Fatal Python Error: PyEval_RestoreThread: NULL tstate

def sendDetecRMS():
    resetGraph()
    time.sleep(0.2)
    fig.suptitle('Detector RMS')
    s.changePlot = True
    if s.numPlot == s.plotMaxLength:
        resetGraph()
    else:
        s.sendSerialData('R')
        s.isRun = True
        s.readSerialStart() # Comienza el hilo background

def sendDetectLOG():
    resetGraph()
    time.sleep(0.2)
    fig.suptitle('Detector Logarítmico')
    s.changePlot = False
    if s.numPlot == s.plotMaxLength:
        resetGraph()
    else:
        s.sendSerialData('L')
        s.isRun = True
        s.readSerialStart() # Comienza el hilo background

def resetGraph():
    fig.suptitle('')

```



```

s.sendSerialData('J') # Se resetea a los arduino
s.stopReceive()
print('Graph Reset')

for i in range(s.plotMaxLength): #Rellenamos los datos del valor mínimo
    s.data3[i] = -55
s.data1 = s.data3
s.data2 = collections.deque([0] * s.plotMaxLength, maxlen=s.plotMaxLength)
s.numPlot = 0

def filterGraph():
    print('AjustarEscala')
    datos = s.data1
    datos = np.array(datos)

    fs = 28.8
    fc = 1 # Frecuencia de Corte del Filtro
    w = fc / (fs / 2) # Normaliza la frecuencia
    b, a = signal.butter(5, w, 'low')
    output = signal.filtfilt(b, a, datos)
    s.data1 = output
    for i in range(len(datos)):
        s.data2[i] = (10**(s.data1[i]/10))*1000

def NormalizeGraph():
    print('Normalizar')

    datos1 = s.data1
    datos1 = np.array(datos1)

    datos2 = s.data2
    datos2 = np.array(datos2)

    minData = min(datos1)
    maxData = max(datos1)
    print(minData, maxData)
    ax1.set_ylim(minData-2, maxData+2)

    minData = min(datos2)
    maxData = max(datos2)
    ax2.set_ylim(minData-1, maxData+1)

def ConnectPort():
    #*****Comunicacion Serial*****
    portName = port.get()
    s.connect2Port(portName)
    if s.connected:
        labelFin.configure(text="Conectado")
        labelFin.configure(fg = "#000fff000")
    #*****

def RecordData():
    register = filedialog.asksaveasfilename(defaultextension=".txt")
    s.csvData = []
    for i in s.data1:

```

```

        s.csvData.append(i)
    df = pd.DataFrame(s.csvData)
    #df.to_csv(register, index=False, header=False)
    df.to_csv(register, index=True, header=False)
def ReadData():
    register = filedialog.askopenfilename()
    df = pd.read_csv(register, header=None)
    values = df.values.tolist()
    cont = 0
    for i in values:
        s.data1[cont] = i[1]
        cont = cont+1
    for i in range(s.plotMaxLength):
        s.data2[i] = (10**(s.data1[i]/10))*1000
def Motor():
    print(Motor)
    s.sendSerialData('B')

#*****Inicio del Programa*****
plt.ion()
data = np.random.rand(100)
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1,2, gridspec_kw = {'width_ratios':[1, 1]},subplot_kw=dict(projection='polar'))
fig.subplots_adjust(wspace=0.3)
fig.suptitle("")
lineLabel1 = 'Potencia dBm'
timeText1 = ax1.text(-0.2, 0.98, "", transform=ax1.transAxes)
lines1 = ax1.plot([], [], label=lineLabel1)[0]
ax1.legend(loc=1)
lineValueText1 = ax1.text(0.15, -0.14, "", transform=ax1.transAxes)
lineLabel2 = 'Potencia Watts'
timeText2 = ax2.text(-0.2, 0.98, "", transform=ax2.transAxes)
lines2 = ax2.plot([], [], label=lineLabel2)[0]
ax2.legend(loc=1)
lineValueText2 = ax2.text(0.15, -0.14, "", transform=ax2.transAxes)
#*****

#***** Creacion de la Interfaz Grafica *****

# PARTE 1
root = tkinter.Tk()
root.wm_title("Medicion Espectro de Radiacion de Antenas")
root.title("Medicion Espectro de Radiacion de Antenas")

w = 1100
h = 800
extraW=root.winfo_screenwidth() - w
extraH=root.winfo_screenheight() - h
root.geometry("%dx%d%+d%+d" % (w, h, extraW / 2, extraH / 2))
tkinter.Label(master = root, text = "Patrón de Radiación de una Antena", font= ("Times New Roman", 14)).pack(fill=tkinter.X)
frame1 = Frame(root, relief=tkinter.RAISED, borderwidth=1, bg='white')
frame1.pack(fill=tkinter.BOTH, expand=True)
frame2 = Frame(frame1, relief=tkinter.RAISED, borderwidth=1)
frame2.pack(fill=tkinter.BOTH, expand=True, side=tkinter.BOTTOM)
canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=frame1)

```

```

canvas.draw()
canvas.getTk_widget().pack(side=tkinter.TOP, fill=tkinter.BOTH, expand=1)
toolbar = NavigationToolbar2Tk(canvas, frame1)
toolbar.update()
canvas.getTk_widget().pack(side=tkinter.TOP, fill=tkinter.BOTH, expand=1)

# PARTE 2
label = tkinter.Label(master=frame2, text = "Captura de Datos:", font= ("Times New Roman",14), fg='blue')
label.grid(row=0, column=3)
button = tkinter.Button(master=frame2, width=15, text="Detector RMS", command=sendDetecRMS)
button.grid(row=1, column=3)
button = tkinter.Button(master=frame2, width=15, text="Detector LOG", command=sendDetectLOG)
button.grid(row=2, column=3, padx=40, pady=5)
button = tkinter.Button(master=frame2, width=15, text="Reset", command=resetGraph)
button.grid(row=3, column=3)
label = tkinter.Label(master=frame2, text = "Procesos:", font= ("Times New Roman",14), fg='blue')
label.grid(row=0, column=4)
button = tkinter.Button(master=frame2, width=15, text="Ajustar Escala", command=NormalizeGraph)
button.grid(row=1, column=4, padx=40, pady=5)
button = tkinter.Button(master=frame2, width=15, text="Filtrar", command=filterGraph)
button.grid(row=2, column=4, padx=40, pady=5)
button = tkinter.Button(master=frame2, width=15, text="Grabar Datos", command=RecordData)
button.grid(row=3, column=4, padx=40, pady=5)
button = tkinter.Button(master=frame2, width=15, text="Leer Datos", command=ReadData)
button.grid(row=4, column=4, padx=40, pady=5)
label = tkinter.Label(master=frame2, text = "Motor:", font= ("Times New Roman",14), fg='blue')
label.grid(row=0, column=2, padx=40, pady=5)
button = tkinter.Button(master=frame2, width=15, text="Encerar", command=Motor)
button.grid(row=1, column=2, padx=40, pady=5)
label = tkinter.Label(master=frame2, text = "Conexión:", font= ("Times New Roman",14), fg='blue')
label.grid(row=0, column=0, padx=40, pady=5, columnspan=2)
label = tkinter.Label(master=frame2, text = "Puerto: ", font= ("Times New Roman",12))
label.grid(row=1, column=0, padx=40, pady=5, sticky=E)
port = tkinter.StringVar()
port.set("/dev/ttyUSB0")
option = tkinter.OptionMenu(frame2, port, "/dev/ttyUSB0", "/dev/ttyUSB1", "/dev/ttyUSB2", "COM11")
option.grid(row=1, column=1, pady=5)
button = tkinter.Button(master=frame2, text="Conectar", command=ConnectPort)
button.grid(row=2, column=1)
stateConnect = tkinter.StringVar()
labelConnect = tkinter.Label(master=frame2, textvariable = stateConnect , font= ("Times New Roman",10),
fg='red')
labelConnect.grid(row=2, column=3, padx=40, pady=5, columnspan=2, rowspan=3)
labelFin = tkinter.Label(master=frame2, font= ("Times New Roman",10), fg='red')
labelFin.grid(row=3, column=0, padx=40, pady=5, columnspan=2, rowspan=3)
labelFin.configure(text="No Conectado")
label = tkinter.Label(master=frame2, text = "Santiago Icaza", font= ("Times New Roman",12))
label.grid(row=0, column=6, padx=40, pady=5, sticky=E)
label = tkinter.Label(master=frame2, text = "Juan Inga", font= ("Times New Roman",12))
label.grid(row=0, column=6, padx=40, pady=5, rowspan=2, sticky=E)
button = tkinter.Button(master=frame2, text="Salir", command=_quit)
button.grid(row=4, column=6, padx=80, pady=5)

# Configuración Inicial de los Ejes de las Gráficas
ax1.set_ylim(-40,0)

```

```
ax2.set_ylim(-10,20)
```

```
#*****Creacion de la Grafica Animada*****
```

```
baudRate = 38400
```

```
maxPlotLength = 1430
```

```
dataNumBytes = 4      # Numero de bytes para un dato
```

```
s = serialPlot(baudRate, maxPlotLength, dataNumBytes)
```

```
anim = animation.FuncAnimation(fig, s.getSerialData, fargs=(lines1, lines2, lineValueText1,  
lineValueText2, lineLabel1, timeText1), interval=10) # fargs deben ser una tupla
```

```
tkinter.mainloop()
```



#Código Arduino Nano Transmisor

```
int channel = 0;
int data = 0;
long valor = 0;
int valor1 = 0;
int ledPin = 13;
int grado = 1440; // Numero de muestras a transmitir
int retardo = 132; // Retardo entre obtencion de muestras (uS)
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:z
  Serial.begin(9600);
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  analogReference(EXTERNAL);
}
```

```
void(* resetFunc) (void) = 0; // Resetea el Arduino
```

```
void loop() {
  //data = analogRead(A1);
  //Serial.write(data);
  // put your main code here, to run repeatedly:
  if (Serial.available() > 0) {
    channel = Serial.read();
    switch (channel)
    {
      case '1':
        digitalWrite(ledPin, HIGH);
        for (int i = 1; i <= grado; i++) {
          for (int j = 1; j <= 150; j++) {
            valor = valor + analogRead(A4);
            delayMicroseconds(retardo);
          }
          valor1 = valor / 150;
          data = valor1 / 4;
          Serial.write(data);
          valor = 0;
          if (Serial.available() > 0) {
            channel = Serial.read();
            if (channel == '3') {
              resetFunc();
            }
          }
        }
        digitalWrite(ledPin, LOW);
        break;
      case '2':
        digitalWrite(ledPin, HIGH);
        for (int i = 1; i <= grado; i++) {
          for (int j = 1; j <= 150; j++) {
            valor = valor + analogRead(A5);
            delayMicroseconds(retardo);
          }
          valor1 = valor / 150;

```

```
data = valor1/4;  
Serial.write(data);  
valor = 0;  
}  
digitalWrite(ledPin, LOW);  
break;  
  
case '3':  
valor1 = 0;  
valor = 0;  
data = 0;  
resetFunc(); // Se resetea el arduino  
break;  
}  
}  
}
```



#Código Arduino Nano Receptor

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <EEPROM.h>
SoftwareSerial mySerial(7,6);// RX,TX

int ledPin = 13; // Pin de salida al LED indicador
int state = 0; // Variable lectura serial
int data = 0; // Dato recibido del maestro
int numData = 1440; // Numero de datos
const int dirPin = 2; // Direccion Motor
int digPin = 3; // Señal PWM del modulo del Motor
int Enable = 4; //Habilitador del modulo del Motor
int Encerar = 12;
unsigned long timer = 0;
long loopTime = 5000; // microseconds
boolean toggle = false;
byte L;
byte H;
int Direction = 0;
int Temp = 0;

void setup() {
  OCR2A = 100;
  OCR2B = 100;
  TCCR2B = 0b00000110;
  Serial.begin(38400); // Inicia el Puerto Serial
  mySerial.begin(9600); // Inicia Puerto Serial ALterno
  timer = micros();
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // Declara pin de salida
  pinMode(dirPin, OUTPUT); // Declara pin de salida
  pinMode(Enable, OUTPUT);
  pinMode(digPin, OUTPUT);
  pinMode(Encerar, INPUT);
  digitalWrite(ledPin, LOW); // Normalmente Apagado
  digitalWrite(dirPin, HIGH); // Establece la direccion
  digitalWrite(Enable, HIGH); //
}

void (* resetFunc) (void) = 0;
void sendToPC(int* data)
{
  byte* byteData = (byte*)(data);
  Serial.write(byteData, 2);
}

void sendToPC(double* data)
{
  byte* byteData = (byte*)(data);
  Serial.write(byteData, 4);
}

void loop() {
  if(Serial.available() > 0){
    state = Serial.read();
```

```

Serial.write(state);
switch (state)
{
case 'R':
    digitalWrite(Enable, LOW); //Activamos el motor
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    analogWrite(digPin,127); // Señal PWM a 50% en el PIN
    mySerial.write('1');    // Envia el byte 1 (Detector RMS)

    while(mySerial.available()==0) {} // Espera hasta recibir datos
    if(mySerial.available() > 0){
        for (int i=1; i <= numData; i++){ // Recibe cierta cantidad de datos y los envia al PC
            while(mySerial.available()==0) {}
            data = mySerial.read();    // Lee el dato recibido y lo envia al PC
            double val = data;
            sendToPC(&val);

            if(Serial.available() > 0){ // Lee si se recibe algun dato de la PC para detener el proceso
                state = Serial.read();
                if (state == 'S'){    // Se recibio un STOP
                    analogWrite(digPin,0); // Detiene el Motor
                    while(mySerial.available()==0) {}
                    state = Serial.read();
                    if (state == 'R'){
                        analogWrite(digPin,127);
                    }
                }
            }
            else if(state == 'J'){    // Se recibio un RESET
                analogWrite(digPin,0); // Detiene el Motor
                H = highByte(i);    // Guarda la informacion del numero de datos enviados
                L = lowByte(i);
                EEPROM.write(Direction, H);
                EEPROM.write(Direction+1, L);
                EEPROM.write(Direction+2, 1);
                mySerial.write('3'); // Detiene la transmision de datos
                resetFunc();    // Resetea el arduino
            }
        }
    }
}
analogWrite(digPin,0);
digitalWrite(Enable, HIGH); //Desactivamos el motor
break;

case 'L':
    digitalWrite(Enable, LOW); // Activa el motor
    digitalWrite(ledPin, HIGH); // Activa el LED indicador
    analogWrite(digPin, 127); // Prende el motor

    mySerial.write('2');    // Envia el byte 2 (Detector Logaritmico)
    while(mySerial.available()==0) {}
    if(mySerial.available() > 0){
        for (int i=1; i <=numData; i++){
            while(mySerial.available()==0) {}
            data = mySerial.read();

```

```

double val = data;
sendToPC(&val);

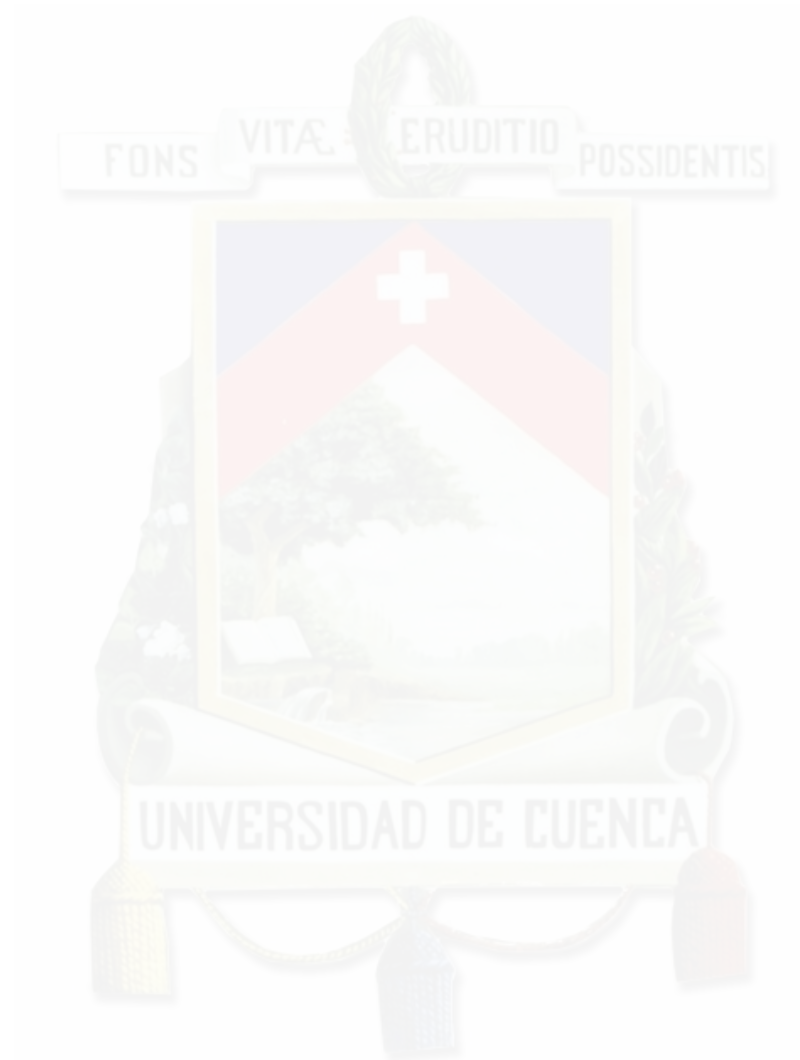
if(Serial.available() > 0){ // Lee si se recibe algun dato de la PC para detener el proceso
  state = Serial.read();
  if (state == 'S'){ // Se recibio un STOP
    analogWrite(digPin,0); // Detiene el Motor
    while(mySerial.available()==0) {}
    state = Serial.read();
    if (state == 'R'){
      analogWrite(digPin,127);
    }
  }
  else if(state == 'J'){ // Se recibio un RESET
    analogWrite(digPin,0); // Detiene el Motor
    H = highByte(i); // Guarda la informacion del numero de datos enviados
    L = lowByte(i);
    EEPROM.write(Direction, H);
    EEPROM.write(Direction+1, L);
    EEPROM.write(Direction+2, 1);
    mySerial.write('3'); // Detiene la transmision de datos
    resetFunc(); // Resetea el arduino
  }
}
}
}
}
analogWrite(digPin,0); // Apaga el motor
digitalWrite(Enable, HIGH); // Desactiva el motor
digitalWrite(ledPin, LOW); // Activa el LED indicador
break;

case 'A': //Resetea la posicion del motor
  H = EEPROM.read(0);
  L = EEPROM.read(1);
  Temp = 0;
  Temp = H << 8;
  Temp = Temp + L;
  digitalWrite(dirPin, HIGH);
  for (int i=1; i <= Temp; i++){
    digitalWrite(Enable, LOW);
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    delay(36);
    delayMicroseconds(750);
    analogWrite(digPin, 127);
  }
  analogWrite(digPin, 0);
  digitalWrite(Enable, HIGH);
  digitalWrite(dirPin, LOW);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
break;

case 'B':
  digitalWrite(dirPin, LOW); // Establece la direccion
  TCCR2B = 0b00000100;
  digitalWrite(Enable, LOW); // Activa el motor

```

```
digitalWrite(ledPin, HIGH); // Activa el LED indicador
analogWrite(digPin, 127); // Prende el motor
while(digitalRead(Encerar)==0){}
digitalWrite(Enable, HIGH); // Activa el motor
digitalWrite(ledPin, LOW); // Activa el LED indicador
analogWrite(digPin, 0); // Prende el motor
digitalWrite(dirPin, HIGH); // Establece la direccion
TCCR2B = 0b00000110;
}
}
}
```





Apéndice F

Modelo de Práctica para el Laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca

Se presenta un ejemplo de práctica para el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca.

Universidad de Cuenca
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones



Teoría de Antenas

Ing. Alcides Araujo, MSc.<alcides.araujo@ucuenca.edu.ec>

Práctica 1: Medición del Espectro de Radiación de Antenas microstrip de 1770 MHz y de 2400 MHz

- **Fecha de Entrega:**
- **Grupos:** Máximo 2 estudiantes por grupo: *entregar un solo informe por grupo.*
- **Valoración:** 5 puntos
- **Recursos:** El equipo de medición del patrón de radiación de antenas del laboratorio de Ingeniería, el software del equipo, la guía y manual de usuario del equipo, un generador de señales de RF, una antena transmisora y una antena de prueba, un filtro de RF, conectores, el libro Antenna Theory 3th ed (A. Balanis)

Objetivos

- Familiarizarse con el uso del equipo de medición de patrón de radiación de antenas.
- Aprender el funcionamiento del software del equipo.
- Obtener el patrón de radiación de dos antenas microstrip.

Introducción

EL rendimiento de una antena depende de varios factores y principalmente de las características de construcción de la misma. El tipo de antena, el material utilizado, las condiciones de construcción definirán los parámetros y el rendimiento de una antena. Algunos de los parámetros están interrelacionados y no es necesario especificarlos todos para obtener una descripción completa del rendimiento de la antena. Los parámetros pueden ser medidos y así se puede caracterizar una antena. Un parámetro fundamental de la antena es su patrón de radiación, que en la mayoría de aplicaciones es necesario conocerlo.

Instrucciones

1. Leer y comprender el manual y la guía de usuario del sistema. Allí se detalla el procedimiento correcto para la configuración del sistema físico y la instalación del software de control en un sistema operativo Windows o Ubuntu.
2. En la Figura 1 se muestra el esquema general del equipo. Comprender el funcionamiento de cada componente.

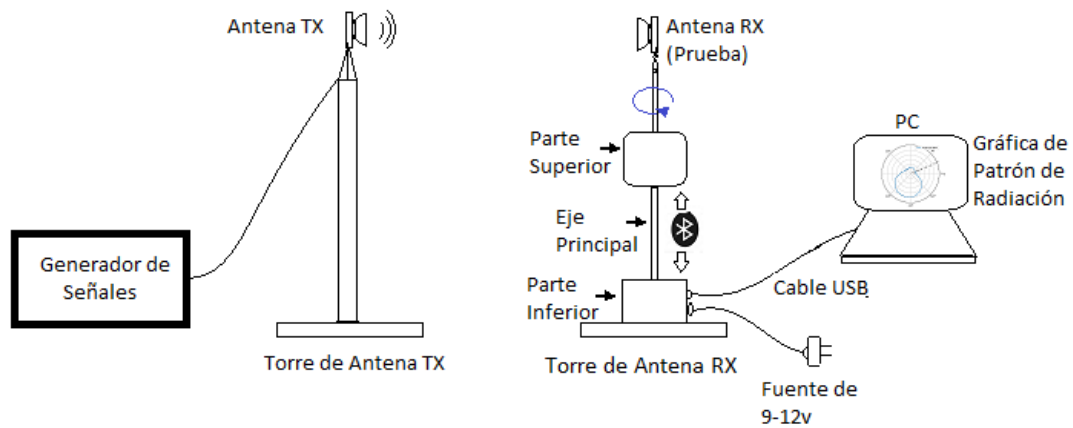


Figura 1: Esquema General del Sistema Didáctico

3. De acuerdo a la Figura 1, configurar el generador de señales a una frecuencia de 1770MHz.
4. Configurar la torre transmisora y la torre receptora de acuerdo a la guía de usuario. Las antenas a utilizarse serán antenas microstrip de 1770 MHz y un filtro de RF a la misma frecuencia.
5. Calcular la distancia de la zona lejana o de Fraunhofer y separar las torres del equipo de acuerdo al resultado. El resultado final deberá ser semejante a la Figura 2



Figura 2: Configuración del Equipo Físico

6. Abrir el programa en su PC, y conectarse con el equipo.
7. Obtener el patrón de radiación de la antena microstrip de 1770 MHz. Realizar los procesos de ajuste de escala y filtrado de los datos obtenidos. Los resultados serán relativamente similares a lo que se muestra en la Figura 3.

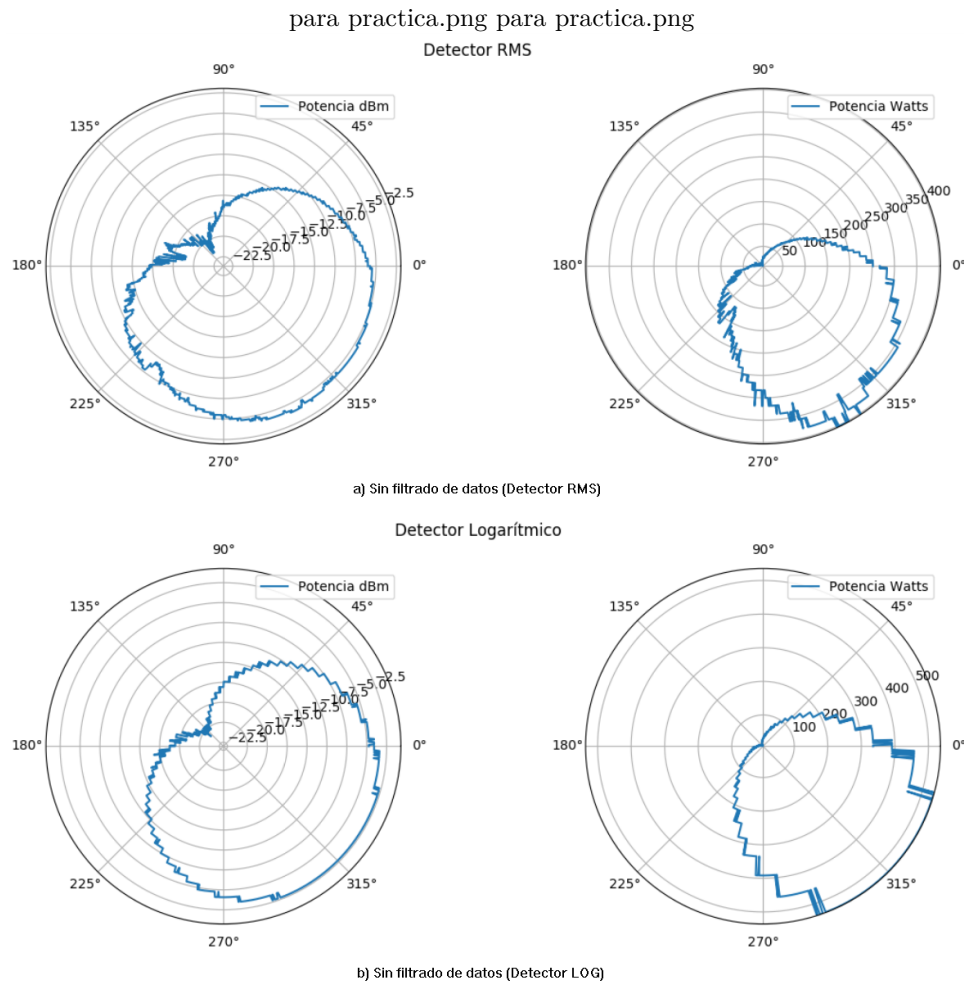


Figura 3: Patrón de Radiación de una antena Microstrip a una frecuencia de 1770 MHz. a) Patrón obtenido utilizando el detector RMS. b) Patrón utilizando el detector LOG.

8. Repetir los pasos necesarios para obtener el patrón de radiación de una antena microstrip de 2.4 GHz ver Figura 4.

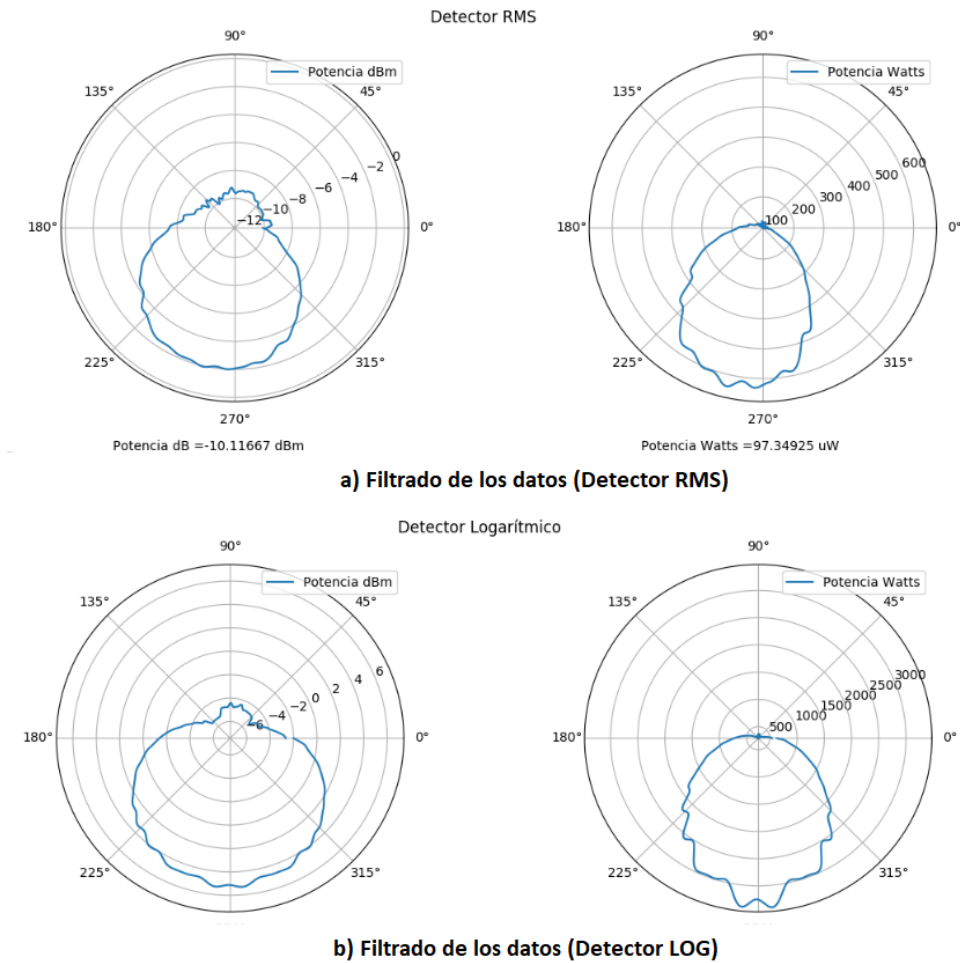


Figura 4: Patrón de Radiación de una antena Microstrip a una frecuencia de 2400 MHz. a) Patrón obtenido utilizando el detector RMS. b) Patrón utilizando el detector LOG.

Preguntas y Resoluciones

- Cualquier duda o pregunta se encuentra resuelta en la guía y manual de usuario.

Formato del Informe

El informe debe ser presentado utilizando \LaTeX con el formato IEEE de doble columna. Éste debe contener los autores, un **Resumen**, una **Introducción**, un **Marco teórico** sobre los parámetros de una antena. Luego, la **Metodología** donde describirán los pasos que siguieron para realizar la práctica. Después, el **Análisis de resultados** donde presentarán las diferentes figuras y su análisis, y además de una subsección de **Conflictos y Respuestas** a las preguntas planteadas, y finalmente, las **Conclusiones**, y la **Bibliografía**.

Dentro de la subsección **Conflictos**, enumere y explique cada uno de los problemas que tuvo al realizar esta práctica, fundamentado en el conocimiento que se tiene sobre la teoría aprendida en clase.



Bibliografía

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. John Wiley Sons, 2012.
- [2] A. L. Antii V. Raisen, *Radio Engineering for Wireless Communication and Sensor Applications*. Artech House, 2003.
- [3] W. Stallings, *Wireless Communications and Networks (2nd Edition)*. Prentice Hall, 2005.
- [4] (2018) Ictv04.- componentes de las instalaciones de rtv en edificios destinados a viviendas. Instituto de Formación Profesional a Distancia.
- [5] B. Constantine, *Antenna Theory: analysis and design*. John Wiley Sons, 2005.
- [6] L. I. W. Y. Rahmat-Samii y R. G. Yoccarino, "The UCLA Bi-polar Planar-Near-Field Antenna Measurement and Diagnostics Range," *IEEE Antennas Propagation Magazine*, 1995.
- [7] R. J. M. J. D. Kraus, *Antennas For All Applications (Third Edition)*. McGraw Hill, 2001.
- [8] J. J. M. Fuentes, *Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación (Segunda Edición)*. Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla., 2013.
- [9] banggood, *ADS-B 1090MHZ Antena*, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.banggood.com/es/ADS-B-1090MHZ-Antenna-p-1331715.html?rmmds=myorder&cur_warehouse=CN
- [10] J. M. Huidobro. (2013) Antenas de telecomunicaciones. Revista Digital de ACTA. [En línea]. Disponible: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf
- [11] R. I. S. Martínez, "Cracterización de una antena yagi-uda en la banda uhf," México, DF, 11 2012.
- [12] . L. Lo, Y., *Antenna Handbook: Theory, Applications and Design*. Springer, 2013.
- [13] J. C. Colombo, *Medición de potencia en RF y Microondas*, 2012.



- [14] A. Technologies, *Power Measurement Basic*, Agilent Technologies, 2005. [En línea]. Disponible: https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/BTB_PowerBasics_2005.pdf
- [15] A. Henze, *Medición de Potencia*, Medidas Electrónicas, 2012.
- [16] J. Carr, *RF Components and Circuits*, Oxford, 2002.
- [17] G. Jaramillo, *Sistema didáctico para la obtención automática de patrones de radiación de antenas en las bandas de 1 Ghz basado en detectores rms de campo eléctrico*, 2017.
- [18] T. Y. Pettit, *Mediciones electrónicas*. ARBO, 1972.
- [19] L. Hawkins, *Accurately determine the RF power of your signal*. Analog Devices, 2013.
- [20] C. Calvo, *Obscurities Applications of RF Power Detectors*. Analog Devices, 2017.
- [21] S. Fraser, *Root mean square or Root-Mean-Square*, 2017.
- [22] B. Schweber, *RF Power Measurement*, Digikey, 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2014/feb/rf-power-measurement-using-rms-detectors>
- [23] *50 MHz to 9 GHz 65 dB TruPwr Detector ADL5902 Data Sheet*, Analog Devices, 2016.
- [24] *1 MHz to 4 GHz, 80 dB Logarithmic Detector/Controller ADL5513 Data Sheet*, Analog Devices, 2008.
- [25] U. D. F. J. de Caldas, *Filtros en RF*, 2014. [En línea]. Disponible: <http://ingenieria1.udistrital.edu.co/archivosudin/cancino/Libro/PDF%20RF%20y%20las%20Com.%20Analógicas/5%20Cap.%203%20Filtros%20en%20RF.pdf>
- [26] B. Good, *RF Bajo nivel de ruido Amplificador 1.3dB NF Ultra Low Noise Amplificador LNA1-4G-20DB*, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.banggood.com/es/RF-Low-Noise-Amplifier-1_3dB-NF-Ultra-Low-Noise-Amplifier-LNA1-4G-20DB-p-1238404.html?rmmds=myorder&cur_warehouse=CN
- [27] *A4988 Stepper Motor Driver Carrier*, Pololu Robotics and Electronics, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.pololu.com/product/1182>
- [28] C. Guinea, *Clasificación de antenas*, 2015. [En línea]. Disponible: <http://mer1516guinea.blogspot.com/2015/12/clasificacion-de-antenas.html>
- [29] *DC to 6 GHz, Envelope and TruPwr RMS Detector/Controller ADL5511 Data Sheet*, Analog Devices, 2014.
- [30] R. Daza, *¿Que es el LNA?*, Communications, 2011.



- [31] I. J. of Advanced Research in Computer Engineering Technology, *Realization of Microstrip Band-Pass Filter Design*, (IJARCET), 2014.
- [32] S. Icaza, *Filtro Pasobanda 2.9 GHz*, Universidad de Cuenca, 2017.
- [33] G. van Rossum, *El tutorial de Python*, Python Software Foundation., 2009. [En línea]. Disponible: <http://docs.python.org.ar/tutorial/pdfs/TutorialPython2.pdf>
- [34] A. Alejandro, *Guia Tkinter Documentation*, Alvarez Alejandro, 2016, publicación 0.1.1.
- [35] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design*. Prentice Hall, jun 1984.
- [36] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 1995.
- [37] J. A. y Antonio Pérez, *Teoría de Antenas (Guía de Estudio)*. Creative Commons Deed, 2008.
- [38] TestWorld, *Keysight (Agilent/HP) 8481A RF Power Sensor, 10 MHz to 18 GHz*, TestWorld, 2015. [En línea]. Disponible: <https://testworld.com/used-electronic-test-equipment/used-electronic-test-equipment/rf-microwave/rf-power-sensors/keysight-agilent-hp-8481a-rf-power-sensor-10-mhz-18-ghz/>
- [39] E. Ifeachor, *Digital Signal Proccesing*. Prentice Hall, 2007.
- [40] B. Good, *LNA 5-3500MHz 20dB Gain banda ancha de bajo ruido RF Amplificador con blindaje Shell*, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.banggood.com/es/LNA-5-3500MHz-20dB-Gain-Broadband-Low-Noise-RF-Amplifier-With-Shielding-Shell-p-1167680.html?rmmds=myorder&cur_warehouse=CN
- [41] finaltest, *¿Que es un generador?*, Venta de instrumentos, 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.finaltest.com.mx/product-p/art-7.htm>
- [42] E. Alvarez, *Divisor de potencia no uniforme*, Universidad de Cuenca, 2019.
- [43] G. Orejuela, *Manejo de software Advanced Design System (ADS)*. Sevilla, 2013.
- [44] L. T. Torres, *Diseño de una antena Vivaldi*, Javeriana.edu.co, 2014.
- [45] B. Good, *1.35GHz-9.5GHz UWB Ultra Wideband Registro Periódico Antena*, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.banggood.com/es/1_35GHz-9_5GHz-UWB-Ultra-Wideband-Log-Periodic-Antenna-p-1167608.html?rmmds=myorder&cur_warehouse=CN